

Evaluation des impacts environnementaux de la protection phytosanitaire du coton au Mali ; comparaison avec le Brésil et les Etats-Unis



NAVEL Marie-Emilie

Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du Master 2^{ème} année

Biologie Géosciences Agroressources Environnement

Spécialité : Ingénierie en Ecologie et Gestion de la Biodiversité

Tuteur de stage : Bruno Rapidel - CIRAD

Co-tuteur : Philippe Girardin - INRA

Année de soutenance : 2006

Remerciements

Tout d'abord un grand remerciement à M. Bruno Rapidel, qui m'a permis de réaliser ce stage d'une grande richesse aussi bien scientifique, qu'humaine.

La seconde personne sans qui ce rapport n'existerait pas est M. Girardin. Merci, pour votre patience, votre prise en charge, et votre clarté d'expression.

Un vif remerciement à M. Alain Renou pour sa disponibilité, les conseils précieux qu'il m'a apporté et pour l'intérêt qu'il a porté à cette étude.

Merci à M. patrice Autfray et M. Fagaye Sissoko qui se sont toujours rendus disponibles, et qui ont fournis toutes les données possibles à la réalisation de cette étude.

Merci à M. Franck Merceron et toute l'équipe Helvetas, qui m'ont permis de réaliser des missions de terrain, et m'ont permis de découvrir la culture biologique et équitable du coton au Mali. Merci Franck pour toute ta gentillesse, tes conseils, et ta grande humilité.

Merci à Bouba Sidi Traoré pour son accueil, sa disponibilité et le partage de ses connaissances étonnantes du terrain.

Merci à M. Pierre Silvie pour sa patience, son dévouement et la riche documentation sur la culture du coton au Brésil.

Un grand remerciement à toute l'équipe « Agriculture durable » de l'INRA-Colmar, pour leur soutien et leur aide dans la réalisation de cette étude : Olivier, Julie, Christian, Nathalie, Emmanuelle et les autres.

Merci aux expatriés de Bamako, en particulier Michel Vaksman, pour sa connaissance, sa clarté d'expression et sa franchise déconcertante.

Merci à M. Gaborel, pour ses explications et qui m'a gentiment aiguillé dans mes recherches.

Merci à toute l'équipe de la CMDT, pour leurs précieuses données. Une pensée particulière à M. Touré, M. Aya, M. Cissé, Mme Babin, pour leur patience, leur grande disponibilité et leurs explications.

Merci à tout le CIRAD Mali, et plus particulièrement à Mariam et Balo, pour leur gentillesse et pour la gestion technique et matérielle des stagiaires.

Un grand remerciement au grain de Bamako : Babou, Seyba, Abou, Madi, Yves, Homar, Wen's....., So, Babi.....et les autres, pour leur accueil particulièrement chaleureux.

Merci à tous les stagiaires du CIRAD pour leur énergie, leur enthousiasme et leur soutien tout au long de la réalisation de cette étude : Aude, Solenn, Sandy, Gwen, Sylvestre.

Et pour finir, mes remerciements vont à M. Kako Nubukpo, pour son inconditionnelle bonne humeur, pour sa vision globale du « système coton », pour nos interminables discussions plus enrichissantes les unes que les autres. Merci pour ton soutien et ton écoute inégalable, durant ce stage.

Table des matières

Introduction	1
Partie 1. Différents modes de production du coton	5
1. Au Mali	5
1.1. La zone cotonnière	5
1.2. Les différents systèmes de culture du cotonnier	6
2. Au Brésil	16
2.1. La culture brésilienne du coton	16
2.2. Choix des régions et des exploitations	16
3. Aux Etats-Unis	19
3.1. La culture du coton américain	19
3.2. Choix des régions et des exploitations	19
Partie 2 : Construction de I-Phy et adaptation de l'indicateur I-Phy_{coton} au Mali, puis au Brésil et aux Etats-Unis	21
1. Construction de l'indicateur phytosanitaire	21
2. Constitution d'une base de données concernant les matières actives contenus dans les pesticides	26
3. Agrégation des modules de l'environnement et adaptation de l'indicateur à la culture du coton au Mali (I-Phy _{coton})	26
3.1. Module « Risque pour l'environnement » (RENV)	26
3.2. Module « Risque pour l'opérateur »	32
4. Adaptation de I-Phy _{coton} pour la comparaison des 3 pays	33
4.1. Module « Risque pour les eaux de surface » (RESU)	33
4.2. Module « Risque pour l'air » (RAIR)	34
5. Test de sensibilité et validation de l'indicateur	34
5.1. Validation de l'indicateur	34
5.2. Test de sensibilité	34
Partie 3. Evaluation des pratiques phytosanitaires	35
1. Comparaison de l'impact environnemental entre les différentes façons de produire du coton au Mali	35
1.1. La culture conventionnelle	35
1.2. La culture biologique	44
1.3. La culture expérimentale	44
1.4. Comparaison des différents systèmes de culture entre eux	45
2. Comparaison de l'impact environnemental entre les façons moyennes de produire du coton au Mali, Brésil, Etats-Unis	46
2.2. Aux Etats-Unis	47
2.3. Comparaison de la culture conventionnelle du coton au Mali/Brésil/USA	48
Partie 4. Discussion et perspectives	49
1. L'échantillon sélectionné	49
2. L'indicateur phytosanitaire « I-Phy _{coton} »	49
2.1. La validation des résultats	49
2.2. Les limites de I-Phy _{coton}	49
2.3. L'agrégation des variables	50
2.4. La notation	
3. Les résultats	50
3.1 Au Mali	50
3.2. Aux Etats-Unis	52
Conclusion	54

Liste des tableaux en pages gauches

Tableau 1 - Production mondiale de coton-fibre en milliers de tonnes et dans les principaux pays en % (2002 à 2005).	1
Tableau 2 - Itinéraire technique du coton cultivé de manière conventionnelle au Mali.	7
Tableau 3 - Evolution des pratiques phytosanitaires sur le coton conventionnel.	7
Tableau 4 - Tableau présentant les tests de corrélation ayant été effectués entre différentes variables pour essayer de faire ressortir des relations éventuelles entre elles	8
Tableau 5 - Tableau présentant les effectifs, les moyennes et les écart-types issues des corrélations	9
Tableau 6 – Types d’herbicides utilisés en pourcentage pour chaque type d’exploitation	11
Tableau 7 – Répartition des différentes matières actives selon les gammes de produits insecticides pour les campagnes de 2001 à 2003	11
Tableau 8 – Clé de stratification de l’échantillon des 991 parcelles	12
Tableau 9 – Itinéraire technique du coton cultivé de manière biologique	13
Tableau 10 – Itinéraire technique du coton prototype conduit sur des parcelles de 150m ²	14
Tableau 11 – Itinéraire technique du coton cultivé sous couvert végétal	15
Tableau 12 – Itinéraire technique du coton au Brésil, pour la culture conventionnelle et biologique	17
Tableau 13 – Itinéraire technique du coton aux Etats-Unis, pour la culture conventionnelle irriguée en Californie et non irriguée en Caroline du Nord	20
Tableau 14 – Nombre de matières actives utilisées par types de traitements phytosanitaires employés dans les Etats de Californie et de la Caroline du Nord durant la campagne de 2003.	20
Tableau 15 - Variables entrant dans le calcul du risque pour chaque module	22
Tableau 16 - Exemple d’un système expert composé de deux variables	23
Tableau 17 – Les limites des classes Favorable, Défavorable et Floue pour les deux variables de l’exemple de calcul	23
Tableau 18 - Détermination par la logique floue du degré d’appartenance aux classes Favorable et Défavorable des variables Dose et Demi-vie et des valeurs de vérité des règles de décision du système expert	24
Tableau 19 - Résumé des résultats des valeurs de vérité	24
Tableau 20 - Valeurs du potentiel de dérive en fonction de la méthode d’application et de la distance du bord de la parcelle à un point d’eau (de 0 : Défavorable à 10 : Favorable)	30
Tableau 21 – Notation des types de pulvérisateurs en fonction de la dérive aérienne engendrée (0 : Défavorable à 10 : Favorable)	31
Tableau 22 - Valeurs du potentiel de dérive en fonction de la méthode d’application et de la distance de la parcelle à un point d’eau (0 : Défavorable à 10 : Favorable)	33
Tableau 23 – Notation des types d’appareils en fonction de la dérive aérienne engendrée (0 : Défavorable à 10 : Favorable)	34
Tableau 24 – Notes obtenues par l’indicateur phytosanitaire sur l’échantillon des 60 parcelles en fonction des pratiques agricoles	35

Tableau 25 – Exemple pour une parcelle à Sinsin (code : 1_7_21_1): Valeurs de I-Phy matières actives pour une campagne de traitement à la parcelle. (Dose en g/ha).	36
Tableau 26 – Exemple pour une parcelle à Bowara (code 5_2_38_1) : Valeurs de I-Phy matières actives pour une campagne de traitement à la parcelle. (Dose en g/ha)	37
Tableau 27 – Rendements coton-graine moyens (en kg) par mode de protection sur l'échantillon des 60 parcelles et des 991	38
Tableau 28 – Comparaison de l'impact environnemental selon différentes pratiques agricoles suivant l'échantillon des 60 parcelles	38
Tableau 29 – Comparaison de deux produits de la Gamme 1 dans un exemple de valeurs de I-Phy matières actives pour un traitement à la parcelle. (Dose en g/ha)	39
Tableau 30 – Comparaison de deux produits de la Gamme 2 dans un exemple de valeurs de I-Phy matières actives pour un traitement à la parcelle (Dose en g/ha)	40
Tableau 31 – Comparaison de deux produits de la Gamme 4 dans un exemple de valeurs de I-Phy matières actives pour un traitement à la parcelle (Dose en g/ha)	40
Tableau 32 – Comparaison de deux produits de la Gamme 4 dans un exemple de valeurs de I-Phy matières actives pour un traitement à la parcelle (Dose en g/ha)	41
Tableau 33 – Comparaison de deux produits de la Gamme 4 dans un exemple de valeurs de I-Phy matières actives pour un traitement à la parcelle (Dose en g/ha)	41
Tableau 34 – Comparaison des valeurs de I-Phy _{ma} pour les matières actives des différents herbicides utilisés au Mali	42
Tableau 35 – Comparaison des deux fongicides utilisé en 2001-2003 et 2005 dans un exemple de valeurs de I-Phy matières actives pour un traitement à la parcelle (Dose en g/ha)	43
Tableau 36 – Notes moyennes attribuées à I-Phy _{coton} pour les 4 itinéraires techniques pratiqués au Mali	45
Tableau 37 – Valeurs moyennes de I-Phy _{Brésil} dans les différentes situations en fonction de la distance au point d'eau le plus proche des parcelles de coton	46
Tableau 38 – Exemple de l'impact de 3 matières actives testées lors d'une campagne de traitements	47
Tableau 40 – Exemple de l'impact de 3/32 matières actives testées lors d'une campagne de traitements en Californie	48
Tableau 41 – Exemple de l'impact de 4/27 matières actives testées lors d'une campagne de traitements en Carline du Nord	48
Tableau 42 – Impact sur l'environnement de la culture du coton dans la meilleure des situations pour les 3 pays (de 0 à 10). (Cas du Mali avec le « Profenofos »)	48
Tableau 43 – Quantités moyennes d'insecticides épandues par mode de protection, pour les campagnes de 2001 et 2002 (Litre/ha)	51
Tableau 44 – Pourcentage d'utilisation d'herbicides par type d'exploitations en fonction de l'échantillonnage	51
Tableau 45 – Comparaison des notes I-Phy _{Mali} suivant une notation plus clémente envers le type de pulvérisateur (0 à 10)	52

Listes des figures en pages gauches

Figure 1 - Répartition des types d'exploitations selon leur période semis	9
Figure 2 - Répartition du nombre de traitements phytosanitaires par campagne en fonction de la taille des exploitations	10
Figure 3 - Répartition des périodes de (kg) semis selon les isohyètes du pays	10
Figure 4 – Répartitions des rendements moyens de coton graine (kg) pour l'échantillon de 991 parcelles et des 60	12
Figure 5 - Les différentes étapes du calcul de l'indicateur I-Phy	21
Figure 6 - Représentation graphique des fonctions d'appartenance de la variable Demi-vie (Courbe en pointillé : fonction d'appartenance à la classe Défavorable ; courbe en plein : fonction d'appartenance à la classe Favorable)	23
Figure 7 - Règles de décisions du module RESO « risque pour les eaux souterraines »	27
Figure 8 - Courbe de tendance de la LAI du coton calculée à partir des données des villages de Katogo, Kara et Sinsin	27
Figure 9 – Détermination des conclusions du potentiel de ruissellement	28
Figure 10 - Règles de décisions du module RESU « risque pour les eaux de surface »	29
Figure 11 - Règles de décisions du module RAIR « risque pour l'air »	30
Figure 12 - Détermination des conclusions du risque vis-à-vis de l'environnement, de l'utilisation d'une substance active, en fonction de l'appartenance des variables (RESO, RESU, RAIR et Présence) aux classes floues "favorable" (rectangle blanc) et "défavorable" (rectangle grisé)	32
Figure 13 - Détermination des conclusions du risque vis-à-vis de l'opérateur en fonction de l'appartenance des variables "Toxicité aiguë" et "Dose" aux classes floues "favorable" et "défavorable"	33

Introduction

1. Situation du coton

1.1. ... dans le monde

Le coton est encore aujourd'hui la principale source végétale pour tout ce qui est tissu, utilisé principalement sous forme de fibres. Aussi, les parties de la graine de coton sont toutes utiles, du linter à la graine, à la fois pour l'industrie et l'alimentation. Aujourd'hui, le coton est cultivé sur les cinq continents, dans une centaine de pays. La production mondiale de coton atteint les 26 millions de tonnes de coton-fibre, en 2004-2005. (Tableau 1) (Mendez del Villar et al., 2006). Il existe de nombreuses variétés adaptées à la diversité des climats. On peut le cultiver de multiples façons.

La culture conventionnelle du coton est souvent montrée du doigt, notamment en raison de sa consommation massive de pesticides. Elle consomme près du quart des pesticides chimiques produits annuellement au niveau mondial. Le cotonnier fait l'objet de différents types de traitements chimiques (insecticides 65%, herbicides 20%, aide à la récolte : défoliants, régulateurs de croissance 14%, fongicides 1%) et ce d'autant plus que la culture est mécanisée (Vaissayre, 2005).

Tableau 1 - Production mondiale de coton-fibre en milliers de tonnes et dans les principaux pays en % (2002 à 2005).

	2002-2003	2003-2004	2004-2005
Monde	19 106	20 702	25 966
Chine	26 %	23 %	24 %
États-Unis	18 %	19 %	19 %
Inde	12 %	15 %	15 %
Pakistan	9 %	8 %	10 %
Brésil	4 %	6 %	5 %
Mali	1 %	1 %	1 %

Source : USDA-FAS, 2005.

1.2. ... en Afrique

La culture du coton en Afrique de l'ouest et du centre, en particulier dans les pays de la zone franc, est un exemple de réussite dans le développement rural. Le système coton a une grande importance économique et sociale. D'une part, environ 16 millions de personnes dépendent directement ou indirectement de la culture du coton en Afrique de l'Ouest. D'autre part, le coton est la première source de devises pour certains pays de l'Afrique de l'Ouest et du Centre : en 2003, il représentait 51% des recettes totales d'exportation du Burkina Faso, 37% du Bénin, et 25% du Mali (Husseim et al., 2005).

1.3. ... au Mali

Les régions cotonnières du Mali représentent 200.000 exploitations qui regroupent environ 2,2 millions de personnes. C'est une agriculture essentiellement de type familial, avec une organisation sociale qui peut être relativement complexe (plusieurs ménages, un chef d'exploitation, des parcelles gérées collectivement ou individuellement,...) (Rapidel et al., 2005). Le coton représente en moyenne 30% des surfaces de chaque exploitation, le reste étant essentiellement de l'agriculture vivrière (Deveze and Halley Des Fontaines, 2005). La filière coton est gérée par une société d'économie mixte, créée en 1974 : la Compagnie Malienne de Développement des Textiles dont le capital est détenu à 60 % par l'État et 40 % par la société DAGRIS (ex Compagnie Française de Développement des Textiles). La filière coton a permis d'assurer à la fois l'approvisionnement en intrants (engrais, pesticides, crédits), l'offre de services agricoles (encadrement et appui aux producteurs et aux organisations paysannes), l'organisation de la commercialisation et la mise en place des infrastructures économiques et sociales de base (routes, écoles, centres de santé). Ce « système coton » a eu des effets d'entraînement positifs sur l'agriculture (par exemple, sur la production des céréales), sur les moyens d'existence des ménages et le développement économique des zones cotonnières ainsi que l'économie globale des principaux pays producteurs de coton (Bélières et al., 2005).

2. Problème de compétitivité du coton africain

Le coton africain constitue l'un des rares secteurs où le continent demeure compétitif, grâce à un faible prix de revient et une bonne qualité par son ramassage manuel. Mais depuis la fin des années 90, l'Afrique de l'Ouest est en crise car le marché du coton comporte plusieurs anomalies. Les américains, premiers exportateurs définissent les cours mondiaux du marché et non les premiers producteurs, comme la Chine.

En 2003, l'organisation des producteurs de l'Afrique de l'Ouest a décidé d'exposer la gravité de leurs problèmes à l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC). Depuis, L'Union Européenne a décidé de diminuer de 65% leurs aides à la production du coton et les Etats-Unis ont été condamnés à une lourde amende censée compenser les producteurs du préjudice subi à travers la baisse du cours mondial occasionné par les subventions à l'exportation américaines (Vergez et al., 2005). Mais, l'Afrique de l'Ouest ne doit pas compter uniquement sur l'issue de ce panel et doit trouver rapidement une voie d'amélioration de la compétitivité de son coton.

Un mouvement de consommateurs s'intéresse de plus en plus aux conditions de production. Les marchés valorisant une certaine éthique, on le voit en poupe. Ainsi, l'évaluation des impacts environnementaux de la culture conventionnelle du coton pourrait être une alternative, dans le marché où les niches « biologique », « équitable », prennent de l'importance.

3. L'utilisation des phytosanitaires

On recense 1 300 espèces d'insectes et d'animaux divers qui se nourrissent aux dépens du cotonnier, dont près de 500 sur le seul continent africain. La pression des ravageurs est moins virulente en Afrique, avec l'inexistence de certains insectes et des écosystèmes sûrement moins favorables à leur adaptation. Les insectes dévorent les feuilles et les capsules, certains s'attaquent aussi aux racines. Les dégâts peuvent être très importants. Ils entraînent des pertes de récolte et la détérioration des fibres, qui ne peuvent plus être utilisées en filature.

Les produits chimiques ont longtemps été la solution universelle aux problèmes posés par les insectes. Désormais, certains d'entre eux développent même des résistances à leur action. Mais l'emploi de phytosanitaires n'a cessé de croître avec l'intensification des cultures. Aux Etats-Unis comme au Brésil les parcelles de coton dépassent les 100 ha et peuvent atteindre les 6000 ha pour les plus grosses exploitations, contrairement au Mali où les surfaces dépassent rarement la dizaine d'hectares. Les campagnes de traitements sont d'autant plus massives que les surfaces sont grandes, il en va de pair pour la pression des ravageurs. On applique plus de 15 traitements en moyenne au Brésil et aux Etats-Unis contre 5 au Mali. L'utilisation de tels produits chimiques ne va pas sans mal sur la santé humaine et les écosystèmes.

C'est dans les années 60 que l'on a vu naître une prise de conscience des effets secondaires des pesticides pour les êtres vivants. Avec pour toile de fond l'objectif d'une agriculture durable, l'heure est à une orientation des pratiques vers un usage plus modéré des pesticides chimiques, tandis que la gestion des impacts environnementaux est intégrée dans une réflexion plus globale sur la maîtrise des problèmes phytosanitaires.

4. Les indicateurs agro-environnementaux

L'évaluation de l'impact environnemental pourrait se faire à l'aide de mesures directes de la présence de substances actives dans le milieu et de l'évaluation de leurs effets non intentionnels. Mais, cette méthode est trop lourde à mettre en œuvre et trop onéreuse. La modélisation n'est pas toujours opérationnelle par manque entre autre d'accessibilité aux données. Le développement d'indicateurs agro-environnementaux, est une solution pour répondre aux besoins d'évaluations.

5. L'indicateur phytosanitaire

L'équipe « agriculture durable » de l'INRA Nancy-Colmar, a mis au point, INDIGO, une méthode scientifique d'évaluation de l'impact environnemental et agronomique des pratiques agricoles au niveau de la parcelle (Girardin and Bockstaller, 2003). Elle est constituée d'une batterie d'indicateurs agro-écologiques, dont l'indicateur phytosanitaire (I-Phy). Cet « indicateur » a été défini comme une variable qui « fournit des renseignements sur d'autres variables plus difficiles d'accès » (Van der Werf and Zimmer, 1998). Il permet l'évaluation environnementale des pratiques agricoles d'une culture. Il chiffre quantitativement l'impact engendré par l'utilisation de produits chimiques durant une

campagne de traitements à la parcelle. Ainsi, l'évaluation de l'impact environnemental de la culture conventionnelle de coton pourrait être étudiée sur la base de I-Phy.

6. Objectifs et démarche

Dans une optique de revalorisation du coton africain, un label de qualité pourrait être développé. Un des points sur lesquels pourrait se fonder ce label est l'aspect environnemental.

Dans un premier temps, nous avons essayé de caractériser les façons moyennes de produire du coton de manière conventionnelle au Mali, au Brésil et aux Etats-Unis. Les systèmes biologiques ainsi qu'expérimentales de la recherche, ont été intégrés afin de comparer la grande différence environnementale qu'il pouvait y avoir avec celle du conventionnelle.

Afin d'évaluer l'impact environnemental de chaque système de culture, l'indicateur phytosanitaire (I-Phy) à été adapté aux différentes pratiques agricoles et conditions du milieu de chacun.

L'impact des campagnes de traitement du cotonnier au Mali a été évalué de 2001 à aujourd'hui. Puis, en vue de caractériser sa durabilité environnementale, elle a été comparée à d'autres zones, celle du Brésil (culture non subventionnée) et des Etats-Unis (culture subventionnée).

Partie 1. Différents modes de production du coton

1. Au Mali

1.1. La zone cotonnière

La zone cotonnière qui est composée du Mali-Sud, du Mali-Ouest (Kita) et de la zone OHVN, s'étend sur 150 000 km² environ. (Carte 1)

La zone d'intervention de la CMDT, notre zone d'étude est composée :

- du Mali sud, c'est à dire les terroirs situés dans la région de Sikasso, et la partie Sud des régions de Koulikouro et Ségou.
- et depuis 1995 le Cercle de Kita situé, dans la région de Kayes dans le Mali ouest.

La superficie de la zone d'intervention est estimée à 137 303 km². Cette zone est caractérisée par une diversité de situations agro-écologiques (démographie, potentiel du milieu naturel, technicité agricole, utilisation de l'espace). Elle est essentiellement drainée par le fleuve Niger, Bani et ses affluents. La pluviométrie annuelle moyenne décroît progressivement en fonction de la latitude, de 1300 mm (au Sud) jusqu'à environ 800 mm à proximité de son extrémité septentrionale (Kébé, 2001).

Carte du Mali et localisation des zones cotonnières



Carte 1 – Carte du Mali et localisation des zones cotonnières.

La culture du coton est familiale. Chaque exploitation décide de l'itinéraire technique qu'elle va suivre. Les exploitations agricoles dirigées par un chef de famille, sont classées en quatre types (A, B, C, D) en fonction de leur niveau d'équipement et de leur cheptel : type A (23%) : exploitations

disposant d'au moins deux paires de bœufs de labour, une charrue, un semoir, une charrette, un âne et un troupeau d'au moins dix têtes en plus des bœufs ; type B (54%) : exploitation disposant d'une paire de bœufs de labour, et une charrue ; type C et D (23%) : exploitation les plus petites et les moins bien équipées, disposant d'une unité incomplète d'attelage ou pas et travaillant très souvent de façon manuelle. Elles ont été regroupées pour l'étude car trop peu représentatives sinon pour des calculs de statistiques. (Keita, 2006)

La culture du coton est pluviale et souvent mise en rotation sur 3 années avec du maïs, et du sorgho ou de l'arachide et parfois du mil. Elle reçoit très peu d'intrants, bien que la CMDT permette l'accès aux crédits. Le coton est récolté manuellement. Il est plus propre qu'un coton récolté à la machine. Il subit moins d'opérations de nettoyage, ce qui préserve sa qualité (CIRAD, 2006).

En plus du coton conventionnel cultivé au Mali, on trouve aussi une petite production de coton biologique et des essais de la recherche qui sont en phase de vulgarisation au milieu paysan. Le coton équitable y est aussi développé depuis 2004, mais ne sera pas pris en compte dans cette étude. Le seul critère imposé par la labellisation en terme d'impact environnemental qui n'est pas respecté par la culture conventionnelle est la non utilisation de la matière active « Endosulfan ». Mais, comme cette dernière est remplacée par une autre matière active « Profenofos » similaire en terme de risque écotoxicologique dans la pratique équitable, nous n'avons pas jugé utile de la prendre en compte dans cette comparaison.

1.2. Les différents systèmes de culture du cotonnier

1.2.1. La culture conventionnelle

a. Généralité

Le coton cultivé de manière conventionnelle au Mali représente 95 % de la surface cotonnière totale, soit 521.029ha pour 200.000 exploitations. En général, les paysans traitent de façon calendaire leur culture de coton. (Tableau 2 : ITK de la culture conventionnelle au Mali). Avant 1995, tous les villages étaient en traitement calendaire. Puis d'autres méthodes de lutte ont été élaborées, avec un usage plus modéré des pesticides, la lutte étagée ciblée (Lec) et la lutte sur seuil (Lss) (Tableau 3).

Ce sont les agents de la CMDT qui sont répartis par secteur, qui informent les villages prêts ou non à passer en Lec ou Lss. Le but de la CMDT est de réduire progressivement les doses de produits phytosanitaires employés sur le coton pour un coût plus rentable et un moindre impact sur l'opérateur.

Tableau 2 – Itinéraire technique du coton cultivé de manière conventionnelle au Mali.

Interventions	ITK protection calendaire	ITK Lutte étagée ciblée	ITK Lutte sur seuil
Préparation du sol (avril à mai)	Epannage de fumure organique ou non selon disponibilité		
	Scarifiage simple + Labour (dès la 1 ^{ère} pluie intensive)		
Traitement de semence	Semences traitées au SAXAL (Lindane (200g/L) + Thirame (250g/L) ou de manière traditionnelle (boue ou bouse de vache ou poudre de néré)		
Semis (mai à juillet : juste après le labour)	$Densité (m) = 0,8 (inter-rang) * 0,3 (inter-poquet) * 5-15 (graines)$		
	Manuel ou mécanique (semoir ou à la corde)		
Entretiens cultureux	<i>Démariage à 2 plants tous les 30cm – Densité théorique 83.500 plants/ha (en réalité 40.000plants/ha)</i>		
	Sarclage (1 ^{er} à 15 JAS) + Buttage (40 à 50JAS)		
Traitement herbicide	Application herbicide de prélevée et/ou de post-levée		
Fertilisation minérale	Au moment du démariage, apport de 100 à 150 kg complexe 14 18 18 ou 14 22 12 et 50 kg d'urée au buttage		
Protection insecticide Produits Organochlorés, organophosphorés + Pyréthroïdes.	Traitement tous les 14 jours à partir du 45JAS.	Le premier traitement se fait comme le calendaire puis application de la moitié de la dose recommandée et si nécessaire on rajoute un complément de phytosanitaire, adapté aux ravageurs identifiés.	Le premier traitement se fait comme le calendaire. Les autres traitements se font si le seuil de ravageurs est dépassé.
L.A.E	5 modes de Lutte Anti-érosive sont appliquées dans le système conventionnel		

JAS : Jour Après Semis

Tableau 3 – Evolution des pratiques phytosanitaires sur le coton conventionnel.

Années	calendaire (ha)	Lec (ha)	Lss (ha)	total (ha)
1999	422675	19821	0	442496
2000	195151	16578	0	211729
2001	454777	36521	611	491909
2002	388548	28980	2515	420043
2003	572661	36985	6297	615943
2004	485238	39297	8688	533223
2005	434084	71812	15133	521029

Lec : Lutte étagée ciblée ; Lss : Lutte sur seuil.

b. Description des données de l'étude

Les données utilisées sont extraites de la base de données du service suivi évaluation de la CMDT correspondant aux campagnes de 2001-2002 et 2002-2003. Dans chacune des régions CMDT, sont choisis des villages qui seront enquêtés. Parmi ces villages, un échantillon représentatif des exploitations est choisi pour le suivi des itinéraires techniques au niveau de la parcelle. Ainsi, on retrouve les caractéristiques de la parcelle (surface), la date à laquelle a été effectuée chaque intervention culturale et ses modalités (apport ou non de fumure organique et de fongicides ; utilisation d'herbicides et d'insecticides, quantité et type de produit...). L'exploitation de cette base de données, de 991 parcelles, a pour but de faire ressortir les façons les plus représentatives de protéger le cotonnier au sein de l'itinéraire technique conventionnel.

Remarque : Dans la base de données, aucunes parcelles n'étaient en protection insecticides Lutte sur seuil.

c. Diverses façons de produire du coton cultivé de manière conventionnelle

Afin, d'adapter l'indicateur, nous allons essayer de faire ressortir les corrélations existantes entre différentes variables de l'itinéraire technique. Des analyses de variance ont été effectuées sur la base de données des 991 parcelles, à l'aide du logiciel SPSS. (Tableau 4 et 5).

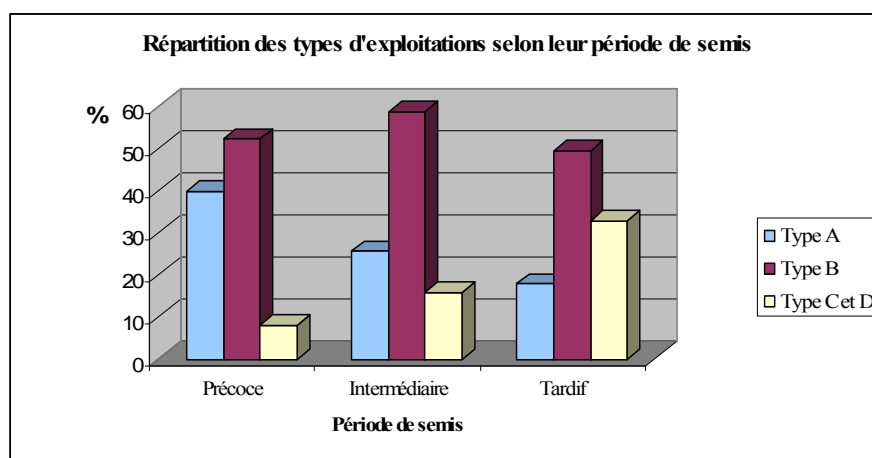
Tableau 4 - Tableau présentant les tests de corrélation ayant été effectués entre différentes variables pour essayer de faire ressortir des relations éventuelles entre elles.

Variables croisées entre elles	Région	Type d'exploitations	Pluviométrie
Date de semis	--	**	*
Nombres de traitements insecticides	--	**	*
Utilisation de fumure organique	--	**	--
Utilisation de fongicides	--	--	--
Utilisation d'herbicides	--	--	--
Rendements	--	**	--

Significativité de la corrélation : -- Aucune ; * = <0,05 ; ** = <0,01.

Tableau 5 - Tableau présentant les effectifs, les moyennes et les écart-types issues des corrélations.

Variables corrélées avec le type d'exploitation	Type d'exploitations	Effectifs	Moyenne	Ecart-type
Date de semis codée 1=Précoce (<5juin) 2=Intermédiaire (5-25 juin) 3=Tardif (>25 juin)	A	275	1,8	0,61
	B	552	1,9	0,59
	C et D	164	2,2	0,62
	Total	991	1,9	0,61
Nombre total de traitements phytosanitaires par campagne	A	275	4,8	1,05
	B	552	4,5	1,12
	C et D	164	4,2	1,12
	Total	991	4,5	1,12
Rendement moyen	A	266	1079	423
	B	534	984	406
	C et D	159	932	355
	Total	959	1002	406
Utilisation de fumure organique 1 = oui ; 2= non	A	275	1,3	0,47
	B	552	1,37	0,5
	C et D	164	1,77	0,42
	Total	991	1,53	0,5
Variables corrélées avec la pluviométrie	Pluviométrie (mm)	Effectifs	Moyenne	Ecart-type
Date de semis codée 1=Précoce (<5juin) 2=Intermédiaire (5-25 juin) 3=Tardif (>25 juin)	700-800	124	1,99	0,62
	800-900	102	2,03	0,64
	900-1000	288	1,82	0,66
	1000-1100	174	1,95	0,69
	1100-1200	220	1,88	0,46
	1200-1300	83	1,96	0,55
	Total	991	1,91	0,61
Nombre total de traitements phytosanitaires par campagne	700-800	124	4,51	0,91
	800-900	102	4,31	1,34
	900-1000	288	4,48	1,23
	1000-1100	174	4,36	0,78
	1100-1200	220	4,67	1,19
	1200-1300	83	4,75	1,06
	Total	991	4,51	1,12



Précoce <5juin ; Intermédiaire 5-25 juin ; Tardif >25 juin.

Figure 1 - Répartition des types d'exploitations selon leur période semis.

Toutes les exploitations traitent en moyennes entre le 5 juin et le 25 juin. Mais la tendance montre qu'une plus grande partie des exploitations A et B réussissent à traiter avant le 5 juin, à contrario du type C et D qui à tendance à traiter de manière tardive (Figure 1). Cela s'explique par un moins bon équipement de la part des petites exploitations qui se retrouvent obligées de louer l'équipement des plus gros ce qui a tendance à repousser l'échéance du semis.

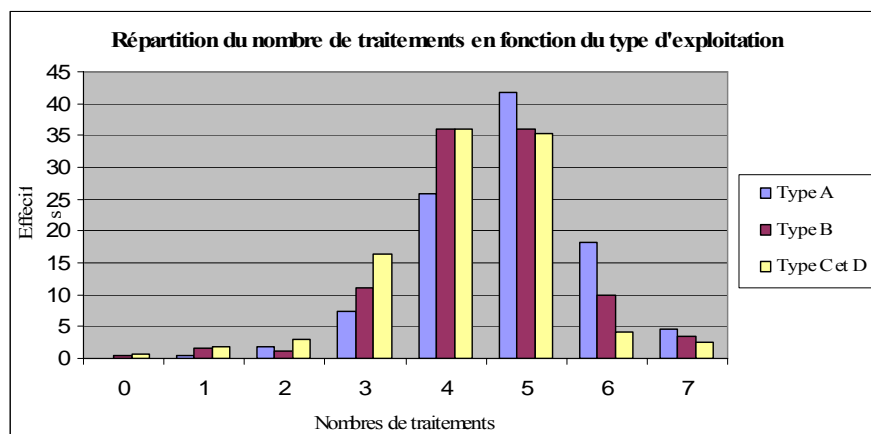


Figure 2 - Répartition du nombre de traitements phytosanitaires par campagne en fonction de la taille des exploitations.

Le nombre de traitements se répartit autour de 5 traitements tous types d'exploitations confondus (Figure 2). Cependant, une grande partie des petites exploitations traitent entre 3 et 5 fois, 4 à 5 fois pour les moyennes et jusqu'à 6 fois pour les grosses. On applique généralement un traitement insecticide de plus lorsqu'on sème précocement.

Les grosses exploitations obtiennent de meilleurs rendements face aux plus petites. Cela s'explique par la précocité des semis et un nombre de traitements phytosanitaires souvent plus élevés.

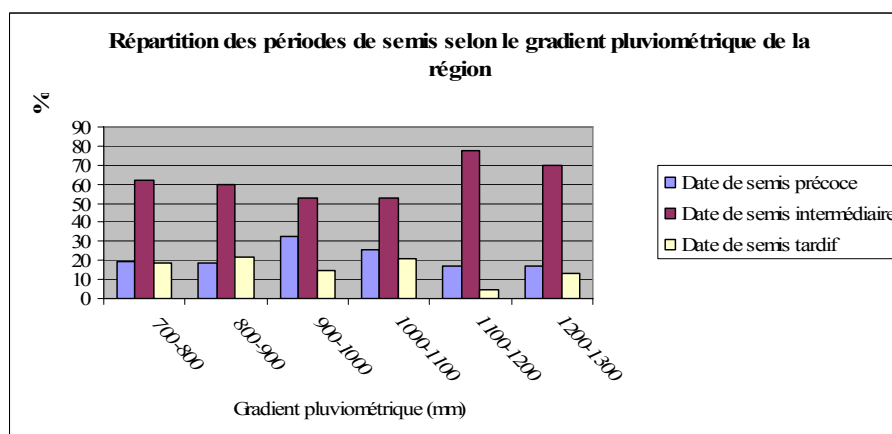


Figure 3 - Répartition des périodes de (kg) semis selon les isohyètes du pays.

La période de semis n'apparaît pas être tributaire du gradient pluviométrique (Figure 3). Cela semble dire que même en zone climatique plus humide, la prise de risque des paysans restent homogènes partout.

Pour les herbicides, la grande majorité des producteurs de coton ne désherbe pas chimiquement leur champ (Tableau 6). Parmi ceux qui utilisent des herbicides, deux types d'herbicides sont majoritairement utilisés : le « Gallant Super », un herbicide de post-levée contenant la matière active « Haloxypop », conseillé à 0,9L/ha pour l'utilisation. L'autre herbicide, de prélevée, appelé soit Cotogard, Cotoforce, Cotovic, Callifor, contient les mêmes matières actives (Prométhryne (250g/L) + Fluométuron (250g/L) à 2,5L/ha).

Tableau 6 – Types d'herbicides utilisés en pourcentage pour chaque type d'exploitation.

Herbicides	Type A	Type B	Type C et D
Aucun	68,00	72,28	70,12
Prélevée (type Cotovic)	13,09	10,14	9,15
Post-levée (Gallant super)	16,00	12,68	14,63
autres	2,91	4,90	6,10

On retrouve 4 gammes de produits sur le marché ayant chacune une efficacité contre certains ravageurs du cotonnier (ANNEXE 1). Les différentes exploitations emploient toutes les gammes de produits. L'utilisation est très hétérogène, on retrouve dans les plans de traitements toutes les combinaisons possibles entre toutes les gammes.

On a utilisé 10 matières actives au Mali pour les traitements insecticides, mais 3 d'entre elles ont été abandonnées après la campagne de 2001 car devenu trop onéreuse pour le marché (Tableau 7).

Pour ce qui est des fongicides, le Saxal (lindane 200g/L + thirame 250g/L) a été employé pour les 2 campagnes de notre échantillon.

Tableau 7 – Répartition des différentes matières actives selon les gammes de produits insecticides pour les campagnes de 2001 à 2003.

Gammes	Matière active	Nom Commercial	Concentration (g/l de m.a.)
Gamme 1	Cyperméthrine/Profénofos Cyperméthrine/Chloropyriphos Ethyl*	Duel 171 EC/Duel 186 EC Nurelle D	21 ou 36/150 36/150
Gamme 2	Cyperméthrine/Méthamidophos Cyperméthrine/Acétamiprid	Cyperfos 336 Conquest C88	36/300 72/16
Gamme 3	Cyperméthrine/Monocrotophos	Cytofos 286	36/250
Gamme 4	Endosulfan Profenofos Indoxacarb* Spinosad*	Endocoton/Thiofanex Tenor Avaunt 150 SC Laser 480 SC	500 500 480 150

* Insecticides abandonnés après la campagne de 2001 pour des raisons financières.

Face aux situations qui restent assez hétérogène sur l'ensemble de la zone cotonnière, nous avons décidé de ne pas discriminer une façon de produire par rapport à une autre dans l'évaluation de l'impact environnemental de la culture conventionnelle du coton.

d. Echantillonnage pour l'adaptation de I-Phy coton

Il aurait été intéressant de calculer I-Phy sur l'ensemble de la base de données. Mais le manque de temps et la lourdeur du travail ont rendu la tâche impossible. Aussi dans un souci de représentativité de l'impact environnemental engendré par la culture conventionnelle, un échantillon de 60 parcelles a été choisi au hasard parmi les 991 parcelles de départ. Le tirage au sort des parcelles a été réalisé à l'aide du logiciel de statistiques « random » par rapport au type d'exploitation, à la période de semis (précoce <5 juin, intermédiaire 5-25 juin, tardif >25 juin) et au type de traitement (calendaire ou lutte étagée ciblée). Le nombre de parcelles sélectionnées a été réparti suivant la stratification de l'échantillon global de 991 parcelles (Tableau 8). Il a été possible de sous diviser les modes de protection en fonction de la date de semis uniquement pour le type B, car plus nombreux.

Tableau 8 – Clé de stratification de l'échantillon des 991 parcelles.

Protection insecticide	Types d'exploitations		
	A	B	C
	275 (23%)	552 (54%)	164(23%)
Calendaire	183 (67%)	427 (77%)	129 (79%)
Lutte étagée ciblée	92 (33%)	125 (23%)	35 (21%)

Nous supposons cet échantillon de parcelles représentatif, comme le montre la répartition des rendements pour l'échantillon sélectionné et pour la totalité des 991 exploitations (Figure 4).

Un test du Khideux a été effectué pour attester de la représentativité de notre échantillon de 60 parcelles. Il a été effectué à 10 degrés de liberté. Le résultat obtenu est bien en dessous de la valeur limité fixée par le test, qui est de 4,865 contre 0,97 obtenu par notre échantillon. Ainsi, nous pouvons attester de la représentativité de notre échantillon, sur lequel sera adapté I-Phy_{coton} pour le Mali.

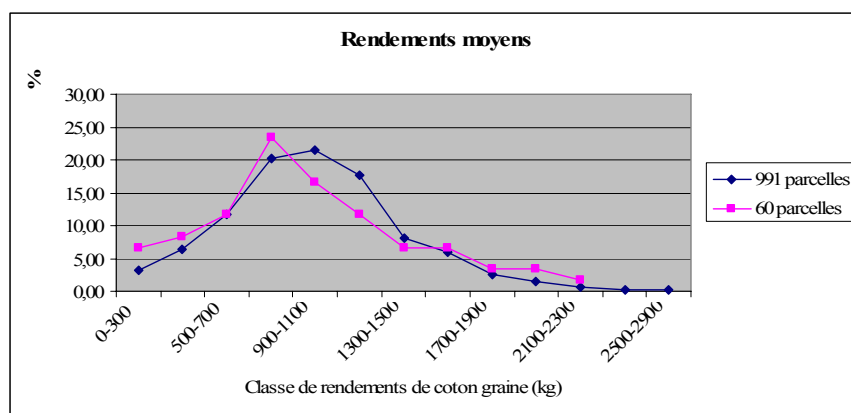


Figure 4 – Répartitions des rendements moyens de coton graine (kg) pour l'échantillon de 991 parcelles et des 60.

1.2.2. La culture biologique et équitable

L'association Suisse pour la coopération internationale, Helvetas, soutient le programme du coton biologique au Mali. Celui-ci est certifié conjointement par ECOCERT international et FLO (Fair Trade Labelling Organization) pour le commerce équitable. Helvetas collabore étroitement avec la CMDT. L'IER (Institut d'Economie Rurale) est un autre partenaire du projet; il mène des recherches dans la lutte biologique contre les parasites. Le programme de promotion du coton biologique&équitable a réellement débuté en 2002 avec une production de 20 tonnes de coton fibre et un rendement moyen de 400kg/ha de coton graine. En 2005, sa production atteint 160 tonnes de coton fibre avec un rendement de 522kg/ha de coton graine. Le nombre de producteurs croît d'années en années. En 2005, ils étaient 1748 dont 40% étaient des femmes (Merceron et al., 2005). La culture biologique est entièrement manuelle, mis à part le semis qui peut-être mécanique. La protection des cotonniers pour la campagne de 2005 a nécessité la préparation de biopesticides employant des plantes locales : graine de Koby (*Carapa procera*), amande de Neem (*Azadirachta indica*), et parfois graines de M'pekou (*Lannea microsperma*). Les expérimentations des cultures biologiques s'étendent sur 3 secteurs : Kolondiéba, Bougouni et Yanfolila, mais les surfaces cultivées restent marginales, 740ha contre plus de 500.000 pour le coton conventionnel. (Tableau 9 : ITK Biologique)

Tableau 9 – Itinéraire technique du coton cultivé de manière biologique.

Interventions	ITK coton biologique
Préparation du sol	1 ^{er} labour
	Epandage de fumure organique selon le choix de l'agriculteur (avril à mars)
	2 ^{ème} Labour
Traitement de semence	Variété STAM - 59 - A
	Semences protégées de manière traditionnelle
Semis (précoce jusqu'au 20 juin – Tardif 21 juin au 5 juillet)	$Densité (m) = 0,8 (inter-rang) * 0,4 (inter-poquet) * 2 (plants)$
	Manuel ou mécanique (à la corde ou au semoir)
Entretiens cultureux (août)	Démariage à 2 plants tous les 30cm – Densité 83.500 plants
	Désherbage puis Sarclage et buttage
Protection par des biopesticides	Poudre d'amande de Neem + huile de Koby + huile de M'pekou
	1 ^{er} Traitement à 45JAS puis toutes les semaines
LAE	Même LAE que l'on retrouve sur le coton conventionnel

JAS : Jour Après Semis

1.2.3. La culture à titre expérimental

La CMDT, l'IER (Institut d'Economie Rurale) et le CIRAD ont mis en place un projet « COT4 », qui a démarré en 2002, dans lequel ils cherchent à développer de nouveaux itinéraires techniques plus rentables et plus durables : l'ITK prototype. Un autre programme, COT6, soutenu en plus par l'AFD (Agence Française de Développement), a permis de démarrer en mai 2005, le projet « SCV », qui vise à mettre au point de nouveaux modes de gestion des sols qui permettent une mise en culture durable et attractive pour les producteurs.

a. La culture du coton prototype

L'objectif du coton prototype est de répondre au stress hydrique que peut subir la plante durant sa croissance. Donc le but est de raccourcir le cycle du cotonnier. Le coton prototype est testé en milieu paysan avec 6 agriculteurs dans 2 villages, Nankorola et Dentiola. Le semis est réalisé au semoir. Il suit les mêmes recommandations que le coton conventionnel en terme de traitements phytosanitaires, mais il utilise un régulateur de croissance en plus, comparé à ce dernier. Ce dernier va permettre de diminuer la surface foliaire finale de 5 à 10% (Turini, 2005). Le rendement moyen obtenu en 2005 est de 1569kg/ha de coton graine. (Tableau 10 : ITK Prototype)

Tableau 10 – Itinéraire technique du coton prototype conduit sur des parcelles de 150m².

Interventions	ITK coton prototype
Préparation du sol	Scarifiage simple (dès la première pluie intensive)
Traitement de semence	Semences délintées protégées par du Mistral Endosulfan (20%) + chlorothalonil (25%)
Semis précoce	$Densité (m) = 0,6 (inter-rang) * 0,1 (inter-poquet) * 1 (plant)$
	Variété G440 (semis à la main)
Fertilisation minérale	Au démarrage, application de 150kg de complexe (14N.22P.12K ou 14N.18P.18K) + 50kg d'urée
Traitement herbicide	Application herbicide de prélevée (COTOVIC®) Prométhryne (250g/L) + Fluométuron (250g/L)
Entretiens cultureux	Démariage à 1 plant tous les 10cm - Densité 166.000 plants Butage à 45JAS
Protection insecticide Produits Organochlorés + Pyréthroïdes	Traitement tous les 14 jours à partir du 45 JAS, 2 traitements à l'endosulfan puis 2 aux pyréthroïdes, 5 ^{ème} traitement en fonction du développement végétatif et fructifère de la culture. CONQUEST C88 : Cyperméthrine (72g/l) et Acétamiprid (16g/l)
Application de Régulateur de croissance	Chlorure de Mèpiquat 2 apports de 500ml à 45 et 59 JAL
LAE	N'ont pas été utilisées sur les parcelles test

JAS : Jour Après Semis ; JAL : Jour Après Levée.

b. La culture du coton sous couvert végétal

L'objectif du coton SCV est d'augmenter les rendements et la biomasse produite à niveau d'intrants optimisé grâce à une augmentation de l'efficacité des facteurs du milieu (eau, nutriments) et des apports de fumure organique, en améliorant peu à peu la fertilité biologique et organique des sols, par une conservation minimale de résidus (Autfray and Sissoko, 2005). Le système SCV se concentre sur un mode de gestion des sols minimale en vue de protéger ces derniers contre l'érosion et d'améliorer leur activité.

L'ITK proposé pour les années à venir, est retenu pour adapter l'indicateur. La première campagne test du coton SCV en milieu paysan a été expérimenté dans 4 villages : Dafara, Fama, Dentiola et Nankorola ; chez 6 paysans.

Les traitements phytosanitaires suivent les mêmes recommandations que pour le coton conventionnel, mais en pratique il y a entre 5 et 7 traitements. L'herbicide le plus couramment utilisé a été le Action 80 DF, celui retenu pour tester l'impact de la culture SCV sur l'environnement. Les rendements oscillent entre 600kg/ha et 1860kg/ha, soit un rendement moyen de 1137kg/ha de coton-graine. (Tableau 11 : ITK SCV)

Tableau 11 – Itinéraire technique du coton cultivé sous couvert végétal.

Interventions	ITK coton SCV
Préparation du sol (mai – juin)	Epandage de fumure organique selon le choix de l'agriculteur
	Présence de pailles – Aucun labour, ni scarifiage
Traitement de semence	Semences délintées protégées par du Caïman rouge (thiram (25g/kg) + endosulfan (25g/kg))
Semis (juin)	Variété : Stam 59A
	$Densité (m) = 0,8 (inter-rang) * 0,3 (inter-poquet) * 2 (plants)$
	Manuel
Entretiens culturaux (juin – juillet)	Démariage à 2 plants tous les 30cm – Densité 83.500 plants
Traitement herbicide (juin – juillet)	Herbicide de prélevée : Action 80 DF (diuron à 800 g de m.a/ha)
Fertilisation minérale	Au démariage, application de 150kg de complexe 14N 18P 18K 6S 1Bo
Protection insecticide	Traitement tous les 14 jours à partir du 45JAS. - 2 premiers avec Thiofanex 500 (endosulfan 500g/l) à 1L/ha - Le reste avec Cyperfos 336 (cyperméthrine 36g/l + methamidophos 300g/l) à 1L/ha
Fertilisation d'urée	50kg d'urée (juillet)
LAE	Cordon pierreux – Haies vives

JAS : Jour Après Semis

2. Au Brésil

2.1. La culture brésilienne du coton (Fontes et al., 2006)

Au Brésil, la culture du coton est présente sur une grande diversité d'environnements, de climats et de sols. Le niveau de technologie et d'intrants agricoles utilisés sont très faibles pour les paysans du Nord-Est du Brésil et très élevés pour ceux du Centre-Est. La production varie de 2000kg de fibre/ha pour les exploitations les plus industrialisées à 400kg de fibre/ha dans la majorité des petites exploitations. La majeure partie du coton produit est pluviale. Durant la campagne 2002-2003, 739.200ha de coton ont été plantés et 850.800 tonnes de coton-fibre récoltées. (Woody and al., 2004).

2.2. Choix des régions et des exploitations

2.2.1. La culture conventionnelle

Les régions productives sont organisées d'après des systèmes de production similaires mais qui diffèrent selon les régions géographiques du Brésil. Nous retiendrons pour cette étude la région la plus productive du Brésil ; celle du Centre-Est, qui couvre 76,5% des aires cotonnières cultivées et 87% de la production totale du pays. Le coton est généralement cultivé sous couverture végétale par 11.195 fermiers. Au sein de cette région, l'état du Mato Grosso est le principal producteur de coton, il représente 53% de toute la production du coton fibre du pays, soit une moyenne de 503.500 tonnes de coton fibre (Fontes et al., 2006). L'indicateur va être testé sur une des exploitations de cet Etat, que l'on estime représentative du pays. L'impact environnemental de la culture conventionnelle de cette exploitation reposera sur les pratiques agricoles de la « fazenda Mourão », dans le Mato Grosso. L'application des herbicides se fait à l'aide de tracteurs enjambeurs munis d'une rampe de 27 m et de buses de type conique. Le reste de la protection se fait en avion pour les insecticides et les fongicides. Il y a entre 10 et 20 traitements durant une campagne (Détail des matières actives employées en ANNEXE 2) (Silvie, 2003). Les surfaces des exploitations vont de 2000 à 6000 ha avec un rendement moyen de 3700 kg/ha de coton graine (Mendez del Villar et al., 2006). Les sols sont, tout comme au Mali, très lessivant, contiennent peu de matière organique et sont plutôt sableux. Ces grosses « fazenda » fortement mécanisées, ont étendu leur surface cotonnière sur des pentes relativement planes pour faciliter la mécanisation. (Tableau – 12 : ITK Brésil)

Tableau 12 – Itinéraire technique du coton au Brésil, pour la culture conventionnelle et biologique.

Interventions	ITK coton conventionnel	ITK coton biologique
Systèmes	Semis direct	Agro-écologique
Préparation du sol	Fertilisation des terres (chaux en début de cycle puis apport d'azote, d'urée)	Fauchage des légumineuses (novembre – décembre)
		Engrais de basse-cour ou Biofertilization selon le choix de l'agriculteur
Traitement de semence	Variété ITA 90 et FM 966	Variétés CNPA 1 et CNPA 7MH
	Protection fongicide avant semis	Semences protégées de manière traditionnelle avant semis
Semis	Fin novembre à début janvier	Fin novembre à début janvier
	Mécanique	Manuel
Entretiens culturaux	<i>Densité 80.000 à 120.000 plants/ha</i>	<i>Densité 80.000 plants/ha</i>
	Aucun	Désherbage puis Sarclage et buttage manuel
Protection des cultures : principe de la lutte intégrée	Application d'herbicide pré et post-levée (1 ^{ière} application un mois avant le semis puis une par mois)	Biopesticides (utilisation de Neem et autres selon le producteurs)
	Application d'insecticide (début en janvier, fin entre avril et mai)	Traitement sur seuil
Application de régulateur de croissance	Application entre le 45 et 59 JAL (on se base sur ce qui est fait au Mali)	Aucun
Application de maturateur + défoliant	Maturateur : enfin de cycle Défoliant : un mois avant la récolte	
Lutte Anti-Erosive	Courbe de niveau lorsque pente >5%	Courbe de niveau lorsque pente >5%
Récolte	De mai à septembre mais traîne jusque octobre/novembre pour les tardifs	

2.2.2. Le coton biologique

La production biologique dépend de l'association ESPLAR et se trouve dans l'état du Ceara, au Nord-Est du Brésil. Ce sont de petites exploitations familiales d'environ 3ha. Le coton pousse sur des sols d'une fertilité moyenne à forte, avec une bonne propriété chimique et un pH neutre.

Les pratiques développées sont dans des systèmes agro-écologiques : le coton pousse en association avec du maïs, des haricots et/ou du sésame. Des légumineuses (comme *Leucaena* et/ou *cajanus cajan*) sont utilisées comme couvert végétal et sont coupées durant la saison des pluies pour en faire un mulch. Le coton est planté sur 5 ou 6 lignes consécutives, et ensuite alternées avec d'autres cultures. L'entretien du sol se fait généralement à la main excepté pour la préparation au semis qui se fait mécaniquement en utilisant la traction animal ou le tracteur. La fertilisation des sols est faite avec l'engrais de basse-cour, selon la quantité disponible des cultivateurs, aussi bien qu'avec la biofertilization (feuilles + engrais frais fermenté mélangé à d'autres composants minéraux, végétaux et animales qui sont trouvés localement).

Les protections des cultures se font par des biopesticides fabriqués à partir d'extraits de plantes mélangés à de l'urine de vache (dont l'extrait de plante de Neem comme au Mali). Ils sont épandus manuellement à l'aide de pulvérisateurs à pression entretenue. Ce sont les mêmes que ceux utilisés au Mali mais leur réservoir est un peu plus grand, 20 litres au lieu de 16. Les traitements sur seuils sont employés, mais les critères quantitatifs sont assez mal définis donc ils varient selon les agriculteurs. (Tableau – 12 : ITK Brésil)

3. Aux Etats-Unis

3.1. La culture du coton américain (NCC, 2006)

Aux Etats-Unis, la culture cotonnière biotechnologique est très majoritaire. Elle représente 82,6% du coton cultivé, avec un coton modifié de manière à ce qu'il soit résistant aux insecticides (Bt) ou/et afin qu'il tolère les herbicides (le roundup). L'agriculture est entièrement mécanisée, du semis jusqu'à la récolte. Elle s'est développée dans 17 états, s'étirant de la Virginie vers la Californie, couvrant près de 5 millions d'hectares. Ils récoltent annuellement plus de 5 millions de tonnes de coton fibre, ce qui représente environ \$120 milliards pour l'économie des Etats-Unis. Sur les 25.000 exploitations américaines existantes, 255 exploitations cultivent plus de 1200 ha de coton. Les petites exploitations de moins de 50 ha continuent à diminuer au détriment des grosses.

3.2. Choix des régions et des exploitations (NCC, 2006)

Pour le cas des Etats-Unis, le choix des exploitations n'a pu être délimité faute de contacts dans le pays. Le site internet « United States Department of Agriculture » fourni des données sur les traitements phytosanitaires moyens d'une campagne de traitements par Etat (USDA, 2006).

La moitié de la culture cotonnière américaine est irriguée et l'autre non, c'est donc sur ce critère que le choix des Etats, pour adapter l'indicateur et représenter l'impact de la culture du coton moyenne aux Etats-Unis, s'est organisé (Tableau 13 : ITK Etats-Unis). Parmi les principaux producteurs, on trouve la Californie (4^{ième} rang), dans la région de Fruitful Rim, avec une moyenne de 0,50 million de tonnes de coton fibre (Mendez del Villar et al., 2006). La Caroline du Nord située dans la région de Southern Seaboard avec une moyenne de 0,23 million de tonnes de coton fibre, se positionne au 6^{ième} rang de la production nationale.

Pratiquement tout le coton de l'état de la Californie est irrigué. Le coton est mis en rotation avec du maïs, du sorgho, des tomates, de la luzerne. Les sols sont généralement profonds et de texture sablo argileuse avec 51% de sable, 24% de limons et 25% d'argile ; à une texture limono argilo sableuse avec 26% de sable, 33% de limons et 31% d'argile (Veenstra et al., 2006). En 2003, 280.000 ha de coton ont été plantés pour une moyenne de 1450 kg de coton-fibre récolté à l'hectare.

En Caroline du Nord, le coton est souvent mis en rotation avec du blé, des arachides, du soja et des fois de la pastèque et du tabac. La majorité du coton est située sur des sols « argilo-sableux » (Richardson, 2003), ils sont labourés 2 fois durant la campagne (Bacheler et al., 1999). Pour la campagne de 2003, 311.619 ha de coton ont été planté et 725 kg de coton-fibre récolté à l'hectare.

Aux Etats-Unis, on applique en moyenne entre 15 et 20 traitements sur les champs de coton américains soit plus d'une vingtaine de matières actives (Tableau 14) (Détail des matières actives employées en ANNEXE 3). Les herbicides sont épandus par les tracteurs de la même manière que dans le Mato Grosso, les insecticides et le reste par avion.

Tableau 13 – Itinéraire technique du coton aux Etats-Unis, pour la culture conventionnelle irriguée en Californie et non irriguée en Caroline du Nord.

Interventions	ITK Californie	ITK Caroline du Nord
Gestion de l'eau	Irrigué (tout les 8 à 21 jours)	Non-irrigué
Surfaces cultivées	280.000 ha en 2003	311.619 ha en 2003
Rendement moyen	1450 kg/ha de coton-fibre en 2003	725 kg/ha de coton-fibre en 2003
Préparation du sol	Labour	
	Fertilisation (185 kg/ha) d'azote (en mai) et 40 kg/ha (en juillet)	
Traitement de semence	Variétés de coton génétiquement modifiée résistante aux insecticides (Bt) ou/et résistante au glyphosate (herbicide : Roundup)	
	Protection fongicide (avant le semis)	
Semis	Entre mars et avril <i>Densité 75.000 à 140.000 plants/ha</i>	Entre mi avril et fin mai <i>Densité 69.000 à 136.000 plants/ha</i>
	Mécanique	
Entretiens culturaux	Labour (pendant la phase post-émergence, puis Sarclage (tout au long de la campagne) avec application d'herbicides chimiques de pré et post-levée.	
Protection des cultures	Application d'insecticide dès le premier bourgeon	
Application de régulateur de croissance	Application du chlorure de mépiquat vers le mois de juillet	Application du chlorure de mépiquat vers le mois d'août
Application des défoliants	Mois de septembre	Mois d'octobre
Récolte	Octobre pour les plus précoces à mi-novembre pour les plus tardifs	Fin septembre à début Novembre

Tableau 14 – Nombre de matières actives utilisées par types de traitements phytosanitaires employés dans les Etats de Californie et de la Caroline du Nord durant la campagne de 2003.

Traitements phytosanitaires	Californie (en Nb de m.a)	Caroline du Nord (en Nb de m.a)
Fongicides	-	3
Herbicides	10	10
Insecticides	14	8
Autres (régulateur de croissance + Défoliant)	8	6
TOTAL	32	27

Partie 2 : Construction de I-Phy et adaptation de l'indicateur I-Phy_{coton} au Mali, puis au Brésil et aux Etats-Unis

1. Construction de l'indicateur phytosanitaire

Etape 1 Calcul d'un risque par module pour chaque application d'une matière active.

Dans le calcul de l'indicateur I-Phy, le risque pour l'environnement lié aux matières actives employées, est découpé en 4 modules : le risque d'entraînement vers les eaux souterraines (**RESO**), vers les eaux de surface (**RESU**), le risque de propagation vers l'air (**RAIR**), et le risque lié à la **DOSE** déversée dans le milieu (Figure 5). Le risque pour l'opérateur est signalé, mais n'intervient pas dans le calcul de I-Phy.

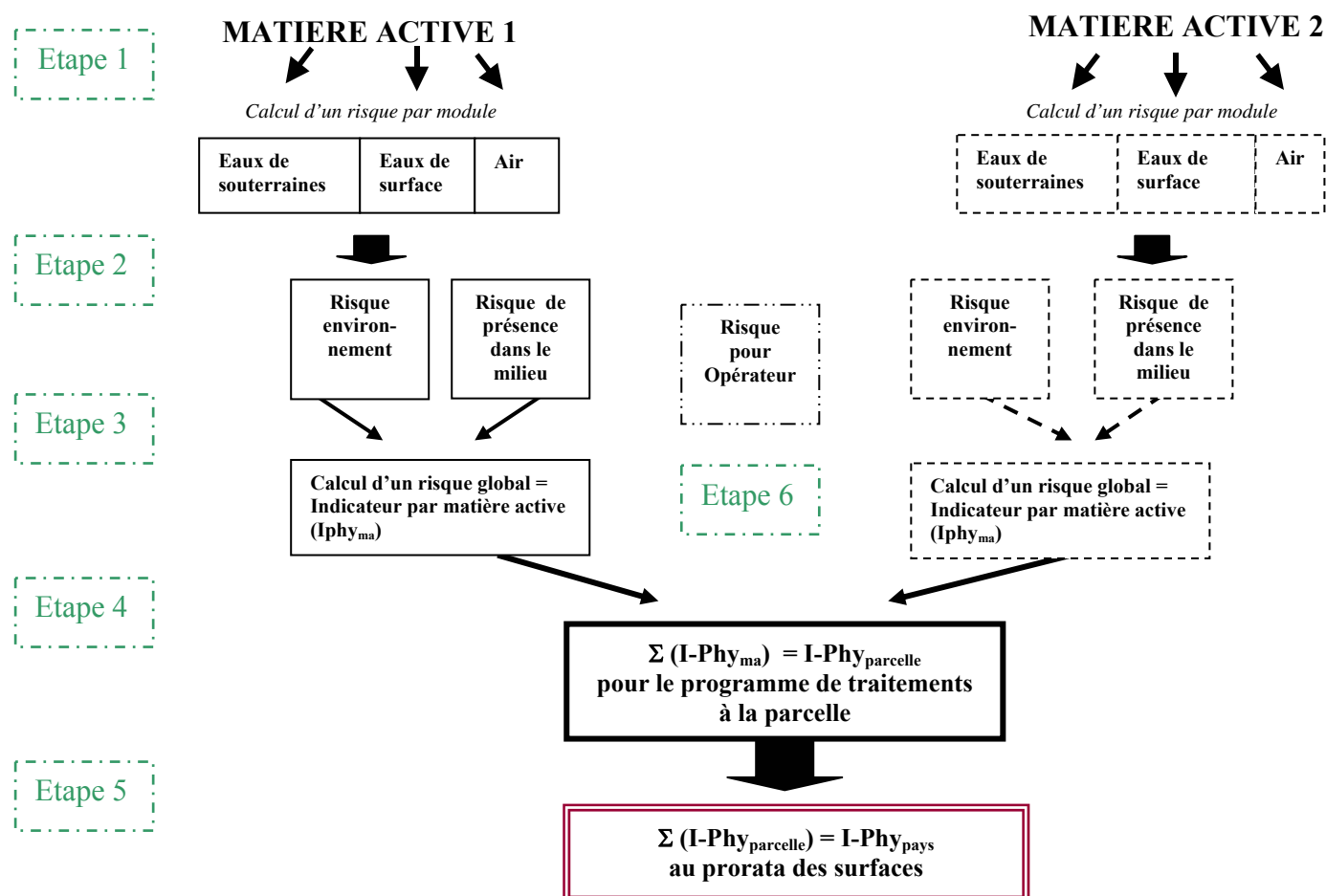


Figure 5 - Les différentes étapes du calcul de l'indicateur I-Phy.

Etape 1 : Calcul d'un risque par module pour chaque application d'une substance active.

Etape 2 : Calcul d'un risque global pour l'environnement pour chaque application d'une matière active (RESO, RESU et RAIR = RENV).

Etape 3 : Calcul d'un indicateur pour chaque application d'une matière active ($I-Phy_{ma}$).

Etape 4 : Calcul d'un indicateur global pour l'ensemble d'un programme de traitements appliqués à la parcelle ($I-Phy_{parcelle}$).

Etape 5 : Calcul d'un indicateur global par pays, pour l'ensemble d'un programme de traitements appliqués sur les parcelles au prorata des surfaces ($I-Phy_{pays}$).

Etape 6 : Calcul du risque pour l'opérateur pour chaque matière active mais il n'est pas pris en compte dans I-Phy, c'est juste une alerte pour l'utilisateur.

a. Variables utilisées

Chacun des risques est exprimé sur une échelle entre 0 (risque maximum) et 10 (risque nul), sachant que 7 est la limite de l'acceptable (gestion respectueuse de l'environnement). On utilise pour l'évaluation des impacts environnementaux : les caractéristiques physico-chimiques toxicologiques et écotoxicologiques de la molécule utilisée, des informations sur le milieu et le mode d'application. La liste est donnée dans le Tableau 15.

Tableau 15 - Variables entrant dans le calcul du risque pour chaque module

Variables	Unités ou modalités	Dose	Eaux prof.	Eaux surf.	Air
<i>Variables liées à la substance active</i>					
Demi-vie (DT 50)	jours			X	X
GUS ¹	-		X		
Constante de Henry K _H ²	-				X
DJA ³	mg.kg ⁻¹		X		X
Aquatox ⁴	mg.l ⁻¹			X	
<i>Variables liées au milieu (à la parcelle)</i>					
Potentiel de lessivage	entre 0 et 1		X		
Pourcentage de dérive ⁵	%			X	
Potentiel de ruissellement	entre 0 et 1			X	
<i>Variables liées aux conditions d'application</i>					
Dose d'application	g.ha ⁻¹	X			
Position d'application	(% couverture sol)		X	X	X

¹ Ground Water Ubiquity Score : indice reflétant le potentiel de lessivage de la substance active

GUS = log₁₀ (DT50)*(4-log₁₀ (Koc), le Koc étant le coefficient de partage carbone organique-eau de la molécule.

² Variable sans dimension déterminant le risque de volatilisation de la substance active.

³ Dose journalière admissible (toxicité humaine).

⁴ Toxicité pour la faune (poissons, daphnies) et flore aquatique (algues). On prend la toxicité la plus élevée pour ces trois groupes d'organismes aquatiques.

⁵ exprimé en % de matière-active épandue en fonction de la distance à la rivière. On considère que un risque de dérive > 1% est totalement défavorable.

b. Une méthode de calcul basée sur un système expert associé à la logique floue

L'indicateur I-Phy repose sur l'utilisation de systèmes experts associés à la logique floue, outil mathématique servant à agréger les variables et les modules de l'indicateur

Le système expert

Le système d'expert est fondé sur un ensemble de règles de décisions constituées de prémisses « **SI...** » reliées entre elles par « **ET** », suivies d'une conclusion « **ALORS ...** ». Cette conclusion est traduite, pour la variable, par une valeur comprise entre 0 (impact défavorable) et 1 (impact favorable). Nous présentons un exemple concret pour deux variables qui servent à déterminer le module hypothétique *Risque environnemental* (**RENV**) (Tableau 16).

Nous définissons sur références bibliographiques ou sur la base d'avis d'experts, une classe **Favorable** et une classe **Défavorable**, pour chaque variable du système, il en est de même pour les **Conclusions**.

Lorsque des variables prennent des valeurs proches de la limite des classes fixées (par exemple 9,9 ou 10,1 pour une limite de classe égale à 10), le résultat de la conclusion est différent. Le système expert seul ne convient pas non plus pour les cas où les limites des classes sont vagues ou difficiles à définir.

Tableau 16 - Exemple d'un système expert composé de deux variables.

Prémisses	Prémisses	Conclusions
SI dose est Favorable	ET demi-vie est Favorable	ALORS RENV = 0
SI dose est Favorable	ET demi-vie est Défavorable	ALORS RENV = 0,5
SI dose est Défavorable	ET demi-vie est Favorable	ALORS RENV = 0,5
SI dose est Défavorable	ET demi-vie est Défavorable	ALORS RENV = 1

Dose = La dose de substance active épanchée

DT50 = La demi-vie au champ de la substance active

La logique floue

C'est pour corriger cet artefact que lui est associé une classe de transition progressive entre la classe Favorable et la classe Défavorable. Le rôle de la classe floue est de permettre un passage progressif du seuil favorable au seuil défavorable. Les **choix des limites des trois classes** des deux variables de notre exemple sont définis d'après les données de la littérature (Tableau 17). Des fonctions sigmoïdales lui sont attribuées pour minimiser les effets de bordure entre la classe floue et les classes Favorable/Défavorable (Figure 6). Le tableau 18 illustre le système d'agrégation des prémisses en prenant l'exemple des deux variables Dose (à 500g) et Demi-vie (à 22 jours).

Tableau 17 – Les limites des classes Favorable, Défavorable et Floue pour les deux variables de l'exemple de calcul.

Variables	Valeur Favorable	Valeur Défavorable	Classe Floue
Dose	< 10 g	> 10 000 g	Courbe sigmoïdale
Demi-vie	< 1 jour	> 30 jours	Courbe sigmoïdale

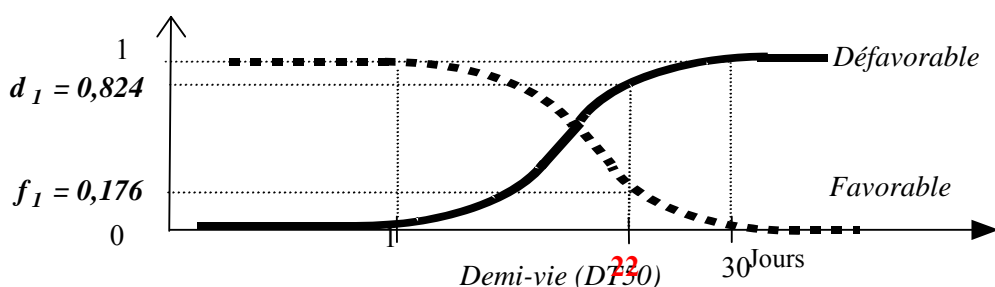


Figure 6 - Représentation graphique des fonctions d'appartenance de la variable Demi-vie (Courbe en pointillé : fonction d'appartenance à la classe Défavorable ; courbe en plein : fonction d'appartenance à la classe Favorable).

Tableau 18 - Détermination par la logique floue du degré d'appartenance aux classes Favorable et Défavorable des variables Dose et Demi-vie et des valeurs de vérité des règles de décision du système expert.

Prémisses	Prémisses		Conclusions
Si Dose est Favorable (degré d'appartenance à la fonction favorable : 0,397)	Et Demi-vie est Favorable (degré d'appartenance à la fonction favorable : 0,176)	Alors	Conclusion 1 (valeur de vérité = Minimum (0,397 ; 0,176))
Si Dose est Favorable (degré d'appartenance à la fonction favorable : 0,397)	Et Demi-vie est Défavorable (degré d'appartenance à la fonction favorable : 0,824)	Alors	Conclusion 2 (valeur de vérité = minimum (0,397 ; 0,824))
Si Dose est Défavorable (degré d'appartenance à la fonction favorable : 0,603)	Et Demi-vie est Favorable (degré d'appartenance à la fonction favorable : 0,176)	Alors	Conclusion 3 (valeur de vérité = minimum (0,603 ; 0,176))
Si Dose est Défavorable (degré d'appartenance à la fonction favorable : 0,603)	Et Demi-vie est Défavorable (degré d'appartenance à la fonction favorable : 0,824)	Alors	Conclusion 4 (valeur de vérité = minimum (0,603 ; 0,824))

Etape 2

Calcul d'un risque environnement pour chaque application d'une matière active.

On détermine ici les résultats, d'une valeur de vérité qui représente le minimum des valeurs des conditions d'une règle. (Tableau 19) La valeur de la variable *Risque environnemental* est obtenue en faisant la moyenne des conclusions des règles de décision, pondérées par leur valeur de vérité :

$$\text{RENV} = \frac{(0 \cdot 0,176 + 0,5 \cdot 0,397 + 0,5 \cdot 0,176 + 1 \cdot 0,603)}{(0,176 + 0,397 + 0,176 + 0,603)} = 0,658$$

Nous obtenons un résultat entre 0 et 1 transposable entre 0 et 10 en multipliant par 10.

Tableau 19 - Résumé des résultats des valeurs de vérité.

Dose	Demi-vie	Impact environnemental
F (0,397)	F (0,176)	0 (0,176)
F (0,397)	D (0,824)	0,5 (0,397)
D (0,603)	F (0,176)	0,5 (0,176)
D (0,603)	D (0,824)	1 (0,603)

Etape 3

Calcul d'un indicateur ($I\text{-Phy}_{\text{mai}}$) pour chaque application d'une substance active.

L'évaluation du risque pour le milieu est issue des risques vis-à-vis des eaux de surfaces, des eaux souterraines, de l'air et de concentration de produit déversé qui va se retrouver dans l'environnement, suivant le même système expert associé à la logique floue.

Etape 4

Calcul d'un indicateur global pour l'ensemble d'un programme de traitements appliqués à la parcelle.

Les valeurs des indicateurs par traitement $I\text{phy}_{\text{mai}}$ sont transformées entre 0 (absence de risque) et 1 (risque maximum) par translation et pondérées par un coefficient qui augmente avec le risque. La formule suivante permet l'obtention de la note de l'indicateur $I\text{-Phy}$ pour un programme de traitements à la parcelle.

$$I\text{-Phy}_{\text{parcelle}} = \text{Min} (I\text{-Phy}_{\text{mai}}) - [\sum (k_i * \text{RENV}_{I\text{-Phy}_{\text{mai}}}) - (k_i * \text{RENV}_{I\text{-Phy}_{\text{mai}}})]$$

Où :

- $\text{Min} (I\text{-Phy}_{\text{mai}})$: note de la substance active la plus défavorable du programme
- k_i : facteur évoluant selon une équation dite de Gompertz ;
 $k = 86,1748574 (e^{(-e[(I\text{-Phy}_{\text{mai}}+19,7)/(-14,44)])})$
- $\text{RENV}_{I\text{-Phy}_{\text{mai}}}$: risque environnemental lié à la matière active i du programme

Si $I\text{-Phy}_{\text{COTON}} < 0$, sa valeur est ramenée à 0.

Etape 5

Calcul d'un indicateur pays pour l'ensemble des programmes de traitements appliqués sur la culture de coton.

Les valeurs obtenues pour $I\text{-Phy}_{\text{parcelle}}$, vont être additionnées au prorata des surfaces cultivées.

2. Constitution d'une base de données concernant les matières actives contenus dans les pesticides.

Les caractéristiques physico-chimiques, toxicologiques et écotoxicologiques des substances actives sont fixées dans une base de données construite à partir de plusieurs bases de données : celle du Comité de Liaison servant à la méthode SIRIS (version française 1998), AGRITOX de l'INRA, TOXNET de la bibliothèque nationale de médecine des Etats-Unis et ARS de l'USDA (Département de l'agriculture des Etats-Unis). Plusieurs variables y ont été recherchées :

- Pour le risque environnement : la DT50, le Koc, la Constante de Henry, la DJA.
- Pour le risque opérateur : DL50 du rat orale/cutanée et CL50 du rat inhalation basées sur le classement toxicologique selon l'Organisation Mondiale de la Santé. (**Voir le glossaire**)

3. Agrégation des modules de l'environnement et adaptation de l'indicateur à la culture du coton au Mali (I-Phy_{coton})

L'application d'un produit phytosanitaire dans l'environnement va engendrer un risque pour celui-ci et concerner plusieurs de ses compartiments : les eaux souterraines, les eaux de surface et l'air. La dose appliquée va aussi jouer sur le risque final engendré par les pesticides.

3.1. Module « Risque pour l'environnement » (RENV)

La construction des arbres de décisions et des notes y afférant, est basée sur ce qui avait déjà été fait en arboriculture et en vigne.

3.1.1. Module « Risque pour les eaux souterraines » (RESO)

Le module RESO traduit le risque pour une substance active d'atteindre les eaux souterraines par lessivage ou lixiviation et d'en affecter les usages. Les variables retenues sont au nombre de quatre : l'indice de Gustafson (permet la distinction entre les pesticides lessivés ou non) (Thiollet, 2003) (Calcul du GUS en ANNEXE 4), la position d'application de la substance active, le potentiel de lessivage du sol, et enfin la Dose Journalière Admissible pour le consommateur (DJA) (Voir ANNEXE 5 : Limites de classes des variables). Les règles de décision sont résumées Figure 7.

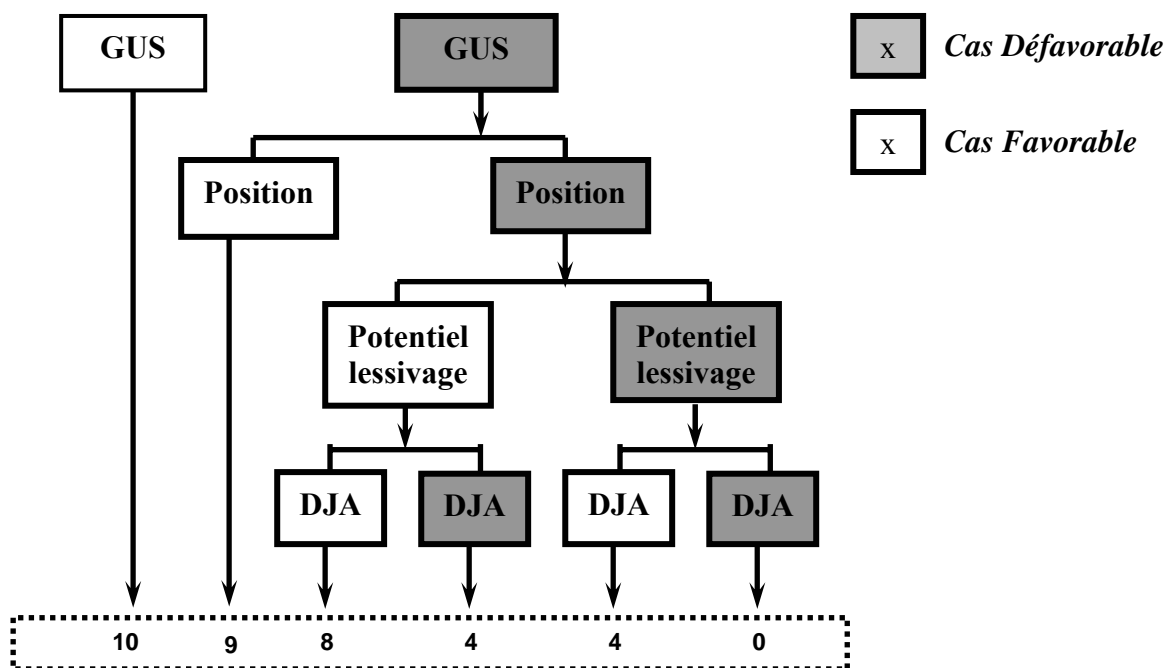


Figure 7 - Règles de décisions du module RESO « risque pour les eaux souterraines ».
 Cas défavorable : la valeur de la variable se retrouve en dessous de la limite de classe fixée en Annexe 5.
 Cas Favorable : la valeur de la variable se retrouve au-dessus de la limite de classe fixée en Annexe 5.

a. La position d'application

La substance active peut soit être incorporée dans le sol, soit être épandue à la surface du sol ou sur la plante. Dans le cas d'un enfouissement ou d'un traitement sur sol nu, la valeur « position » sera défavorable (valeur 0). Dans les autres cas, le développement du couvert végétal est pris en compte car la substance active se retrouve répartie entre le sol et le feuillage. Pour déterminer le pourcentage de recouvrement de la parcelle par la culture du cotonnier, nous nous sommes basés sur une moyenne de données relevées en milieu paysan dans les régions de Bougouni et de Sikasso. Le recouvrement a été calculé pour une trentaine de parcelles dans le village de Katogo en 2002 (Traoré, 2002), entre 25 et 30 parcelles pour les villages de Kara et Sinsin en 2003 (Doumbia, 2003), (Hayo, 2003). Ainsi, le taux d'interception maximal de la culture cotonnière a été estimé à 100% à partir du 50^{ième} jour après semis (Figure 8).

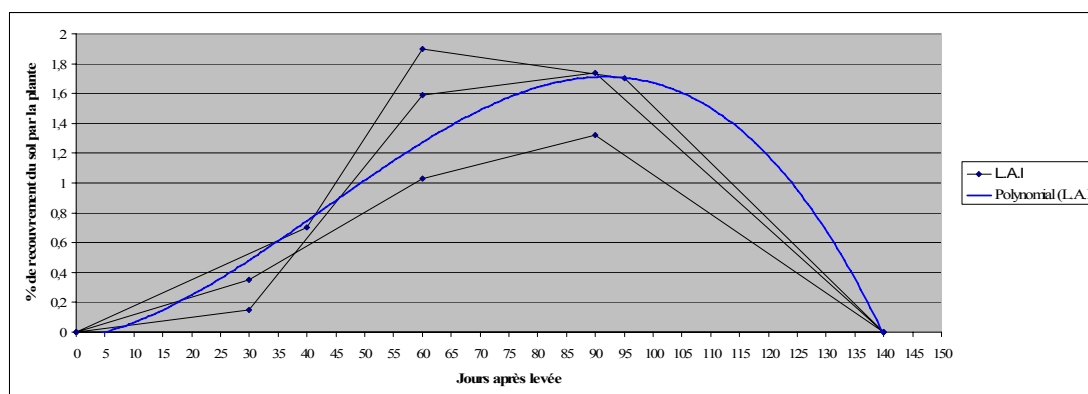


Figure 8 - Courbe de tendance de la LAI du coton calculée à partir des données des villages de Katogo, Kara et Sinsin

b. Le potentiel de lessivage

Le potentiel de lessivage exprime la sensibilité du sol au lessivage. Il est fonction des caractéristiques du sol : le taux de matière organique, la texture et la profondeur du sol. L'agrégation de ces trois variables se fait à l'aide d'un arbre de décisions établi selon Van Der Werf et Zimmer, 1998 et du triangle du GEPPA pour des caractéristiques internationales des sols (Voir ANNEXE 6).

3.1.2. Module « Risque pour les eaux de surface » (RESU)

Le risque RESU traduit le risque pour une substance active d'atteindre les eaux de surface voisines par ruissellement comme par dérive, et de nuire aux organismes aquatiques et à l'homme. Les variables constituant ce module sont au nombre de six : le potentiel de ruissellement engendré par les caractéristiques de la parcelle, la position d'application de la substance active, la durée de vie d'une substance active en plein champ (DT50, le potentiel de dérive par les facteurs climatiques mais aussi techniques, et la toxicité (valeur la moins favorable de la DJA ou de l'Aquatox). (Voir ANNEXE 5 : Limites de classes des variables)

Le module RESU est défini en deux temps. Dans un premier temps on calcule le potentiel de ruissellement, puis on l'agrège avec le potentiel de dérive et la toxicité. Les 2 arbres de décisions ont été élaborés selon une synthèse bibliographique et la consultation d'experts (Figure 9 et 10).

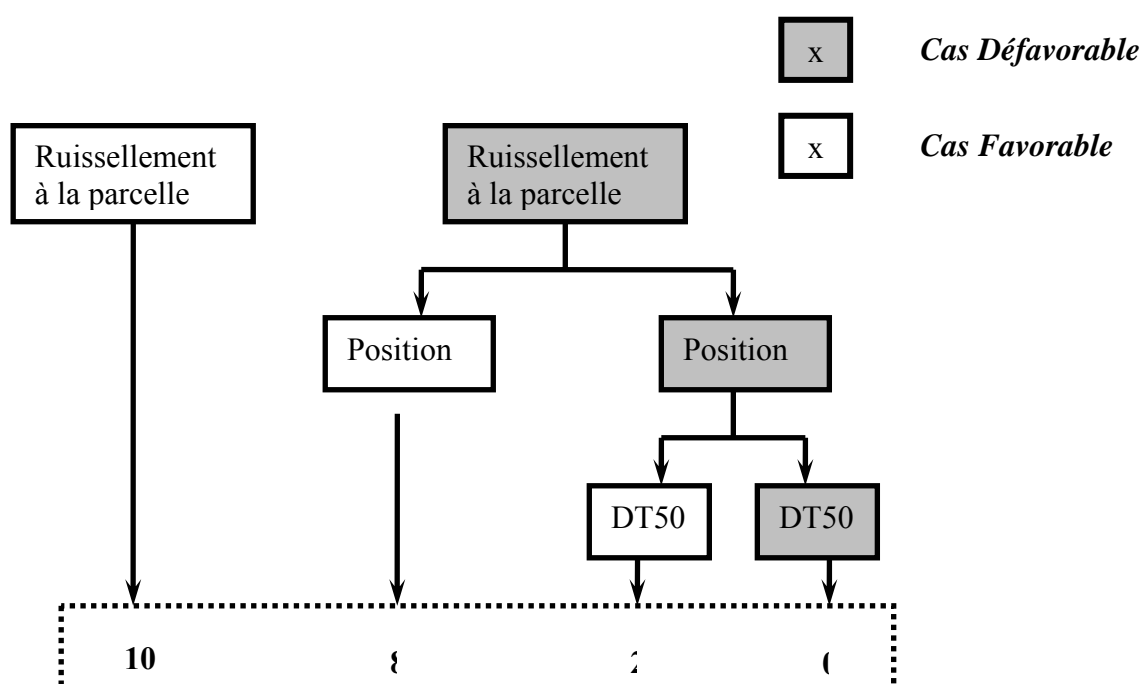


Figure 9 – Détermination des conclusions du potentiel de ruissellement.
DT50 : Demi-vie au champ des matières actives.

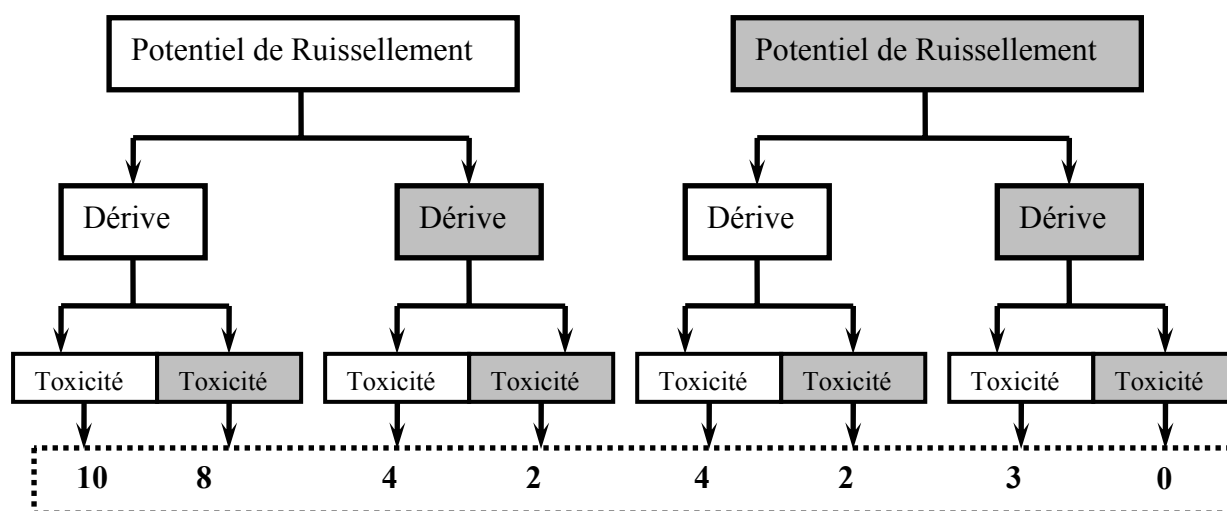


Figure 10 - Règles de décisions du module RESU « risque pour les eaux de surface ».

a. Le ruissellement de la parcelle

Le ruissellement à la parcelle est fonction de la pente. Le type de sol et son état de surface lié à la présence ou non d'une croûte de battance et à sa teneur en matière organique jouent un rôle important dans le déterminisme du ruissellement. Le potentiel de ruissellement, compris entre 0 (pas de risque) et 1 (risque maximum) est donc défini à partir de ces trois variables. Si une lutte anti-érosive est mise en place par les paysans, le potentiel de ruissellement sera pondéré. (Voir le calcul en ANNEXE 7).

La granulométrie de la couche superficielle des sols maliens est de 11 à 28% d'argile ; 5 à 32% de limons ; et 54 à 82% de sables. On cultive le cotonnier sur des sols majoritairement sablo-limoneux, à faible pente (1 à 2 %) et qui ont tendance à former rapidement une croûte de battance (Diallo, 2006). L'installation de cette croûte de battance est due aux fortes pluies tropicales et à la faible teneur en matière organique des sols (0 à 1,7%) qui engendre une mauvaise structure de ces derniers, et joue sur l'infiltration de l'eau.

b. La position d'application (Voir : Partie 2.3.1.1.a)

En comparaison à RESO, la position prend une valeur favorable dans le cas d'un enfouissement. La position d'application va avoir un impact important sur le potentiel de ruissellement car le cotonnier est une plante très couvrante donc va pouvoir permettre de retenir une bonne partie des pesticides.

c. Le potentiel de dérive

Par dérive, nous entendons la quantité de produit susceptible de se retrouver après le traitement, directement dans un point d'eau (fossé en eau ou rivière). Au dessus de 1 % de la quantité épandue, la valeur est considérée comme totalement défavorable. Le potentiel de dérive est estimé en fonction de la technique d'application et de la distance du bord de la parcelle au point d'eau le plus près (Tableau 20). Deux types d'appareils sont utilisés au Mali, les appareils à dos munis d'une lance et les appareils à disque rotatif. Les appareils à disque rotatif sont utilisés pour épandre les produits phytosanitaires

sous le vent ce qui engendre un risque plus important de dérive comparé aux appareils à lance où le jet est dirigé. Le risque de dérive est aussi plus grand, que se soit des insecticides épandus ou des herbicides. L'application des herbicides nécessitant de plus grosses gouttes, diminue l'impact environnemental engendré par la dérive. Ces 2 types d'appareils sont faits de telle façon que la dérive de ceux-ci est quasiment nulle au-delà de 5 mètres. Faute de références bibliographiques, nous nous sommes appuyés sur l'avis d'experts pour mettre en place les notes. Ces notes restent à affiner.

Tableau 20 - Valeurs du potentiel de dérive en fonction de la méthode d'application et de la distance du bord de la parcelle à un point d'eau (de 0 : Défavorable à 10 : Favorable).

Type de traitements	Type d'appareil	Distance à un point d'eau		
		< 3 m	3 à 4 m	4 à 5 m
Insecticides	à disque rotatif	0	2	7
	à lance	4	8	10
Herbicides	à disque rotatif	2	8	10
	à lance	4	8	10

3.1.3. Module « Risque pour l'air » (RAIR)

Le module RAIR de l'indicateur prend en compte le risque de pollution de l'air par un pesticide suite à sa volatilisation et au phénomène de dérive. Sa valeur dépend de quatre variables d'entrée, qui sont : la volatilité du pesticide (Constante de Henry : KH), la position d'application, la DT50, la DJA. (Voir ANNEXE 5 : Limites de classes des variables). Elles sont agrégées suivant la Figure 11.

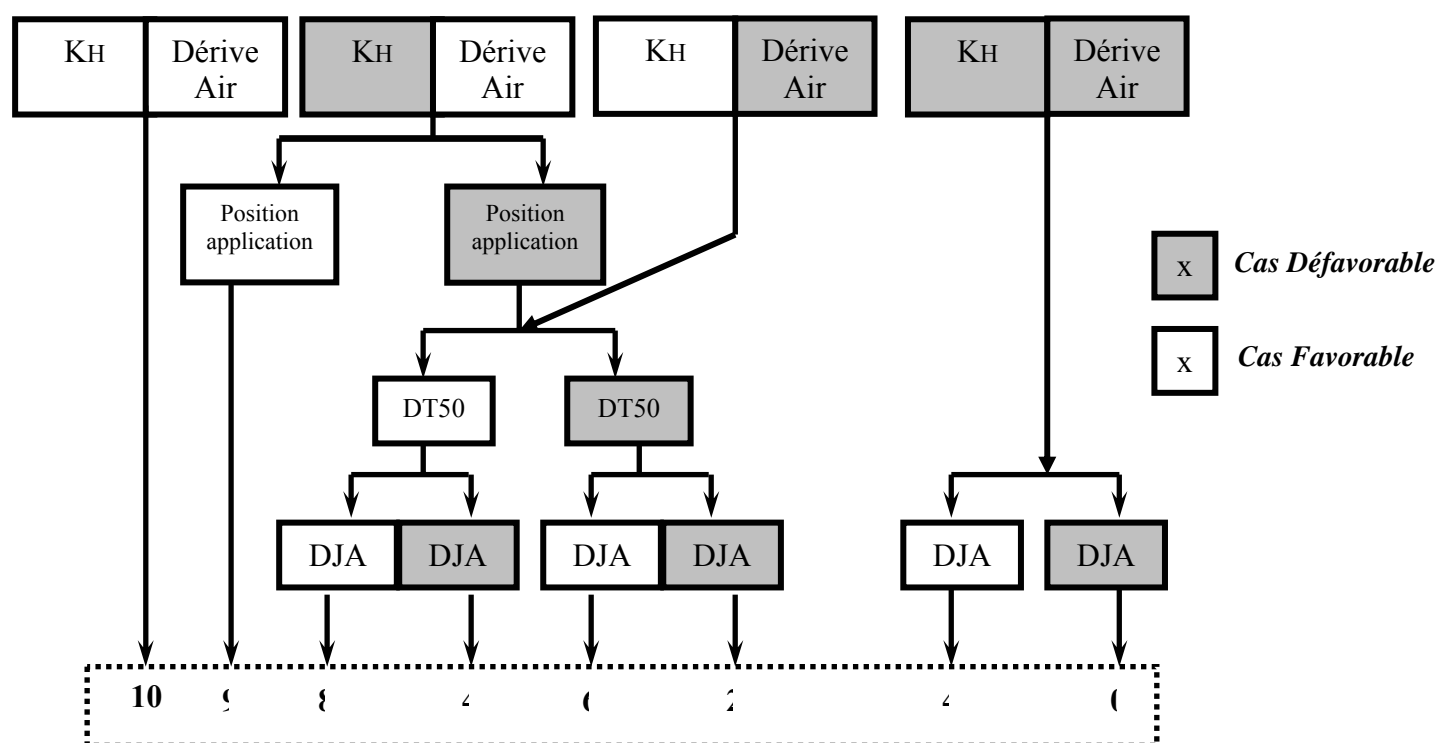


Figure 11 - Règles de décisions du module RAIR « risque pour l'air ».

a. La dérive aérienne (Dair)

Il a été montré qu'un produit phytosanitaire appliqué sur le coton ne se retrouve jamais en totalité sur le coton (Clayton et al., 1993). Une proportion significative de la dose appliquée dérive dans l'atmosphère. Cette variable est fonction du type de pulvérisateur utilisé, du stade de développement du coton et des équipements du pulvérisateur favorisant une réduction du risque de dérive aérienne (Tableau 21). Au Mali, les appareils à dos ont l'avantage d'être munis d'une lance permettant ainsi une pulvérisation dirigée sur les rangs de coton, alors que l'autre type de pulvérisateur est tributaire du vent. Faute de documentation, les notes ont été fixées par les experts de terrain, mais pour être validée, elle nécessiterait d'avoir plus de bibliographie.

Tableau 21 – Notation des types de pulvérisateurs en fonction de la dérive aérienne engendrée (0 : Défavorable à 10 : Favorable)

Types de pulvérisateurs	Notation (entre 0 à 10)
Pulvérisateur à disque rotatif	5
Pulvérisateur à pression entretenue	8

b. La position d'application (Cf Partie 2.3.1.1.a)

Seul le traitement dans le sol est favorable à RAIR, le reste prend une valeur défavorable.

3.1.4. Module « Présence » (DOSE)

Ce module traduit la quantité de substance active épanchée dans le milieu et ne dépend que d'une variable, la dose. Plus la quantité de substance active épanchée est importante lors de l'application, plus le risque environnemental pour la parcelle est élevé (Van der Werf and Zimmer, 1998). (Voir ANNEXE 5 : Limites de classes des variables)

3.1.5. Le « risque vis-à-vis de l'environnement » (RENV)

On donne la même importance aux trois modules de l'environnement. L'agrégation des 3 modules de l'environnement et de la dose suit l'arbre des décisions décrit ci-dessous (Figure 12).

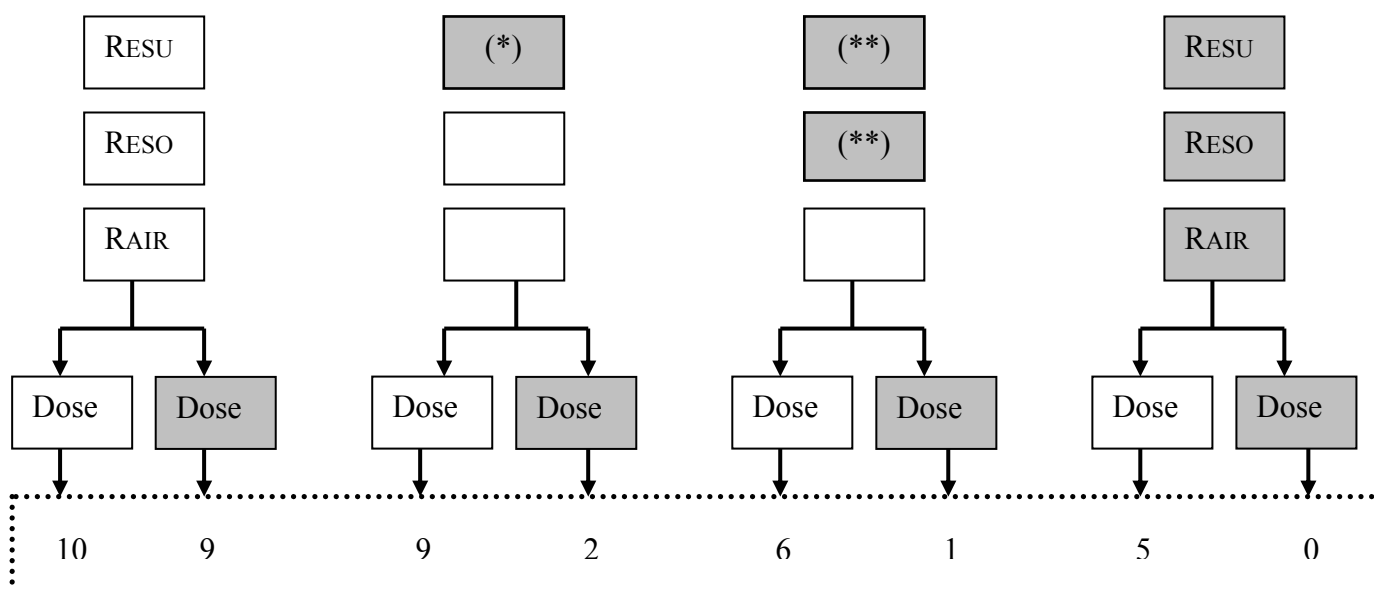


Figure 12 - Détermination des conclusions du risque vis-à-vis de l'environnement, de l'utilisation d'une substance active, en fonction de l'appartenance des variables (RESO, RESU, RAIR et Présence) aux classes floues "favorable" (rectangle blanc) et "défavorable" (rectangle grisé).

(*) Il existe un risque pour un des trois modules (RESO ou RESU ou RAIR = 0)

(**) Il existe un risque pour deux des trois modules (RESO ou/et RESU ou/et RAIR = 0)

3.2. Module « Risque pour l'opérateur »

Il n'est pas pris en compte dans le calcul de I-Phy_{coton} mais il y a été juxtaposé. Au Mali, l'épandage des phytosanitaires est généralement pratiqué sans aucune protection par les paysans. L'exposition est surtout liée à la dose épandue et à la pénétration par la peau. Cette dernière n'est pas toujours accessible pour les substances actives, d'où le choix d'une absorption fixée (10% de ce qui rentre en contact avec la peau de l'opérateur). Cette hypothèse est fixée par un logiciel (POEM) qui modélise l'exposition qu'encourt un opérateur en fonction de plusieurs variables (type d'appareil, type de protection, la dose appliquée, la surface traitée, le temps de travail, et les caractéristiques toxiques de la matière active : DL50 orale/cutanée, CL50 inhalation). C'est ainsi que les limites de la variable "dose" sont estimées. (Voir ANNEXE 5 : Limites de classes des variables)

Pour estimer le danger, on utilisera le classement toxicologique des substances actives prévu par l'OMS et repris par la Communauté Européenne (ANNEXE 8). Le classement « Neutre » des matières actives est considéré comme « Favorable », et « Très toxique » comme « défavorable ». Enfin, le risque sera issu de l'agrégation des variables "dose" et "toxicité aiguë" (Figure 13).

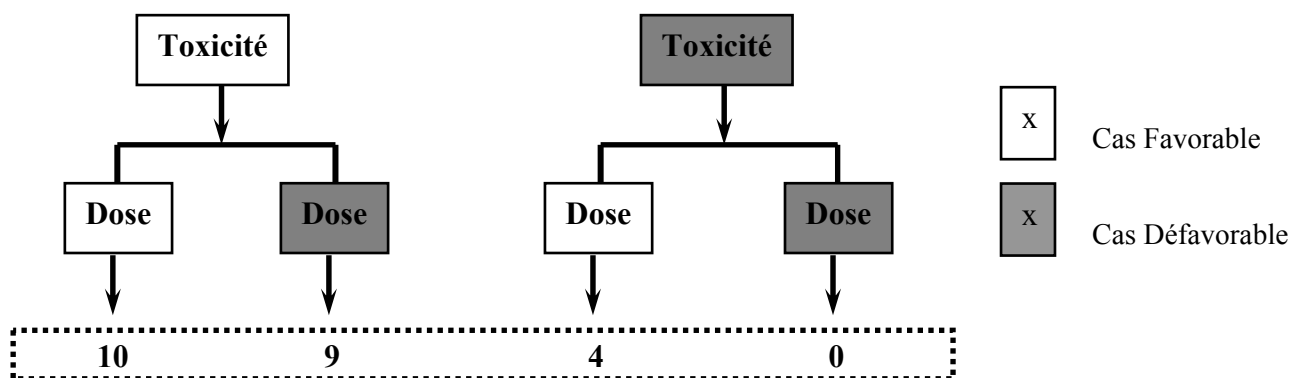





Figure 13 - Détermination des conclusions du risque vis-à-vis de l'opérateur en fonction de l'appartenance des variables "Toxicité aiguë" et "Dose" aux classes floues "favorable" et "défavorable".

Pour simplifier le message, les valeurs seront transformées en un avertissement de couleur.

-  Risque faible (valeurs supérieures à 7)
-  Risque moyen (valeurs d'indicateur comprises entre 4 et 7)
-  Risque élevé (valeurs inférieures à 4)

4. Adaptation de I-Phy_{coton} pour la comparaison des 3 pays

Certaines variables vont être différentes d'un pays à un autre. Le type de sol et le climat par exemple n'auront pas le même impact sur le potentiel de ruissellement (Voir ANNEXE 7 : Variable potentiel de ruissellement). De plus, la dérive engendrée par ces derniers n'a pas le même impact sur l'environnement, et va être notée en conséquence. Les notations ont été évaluées à partir de la bibliographie ou des dires d'experts.

4.1. Module « Risque pour les eaux de surface » (RESU)

Le potentiel de dérive va être différent pour le Brésil et les Etats-Unis, car la technique d'application n'est pas la même qu'au Mali, et engendre de plus gros risque (Tableau 22).

Tableau 22 - Valeurs du potentiel de dérive en fonction de la méthode d'application et de la distance de la parcelle à un point d'eau (0 : Défavorable à 10 : Favorable).

Type de traitements	Type d'appareil	Distance à un point d'eau					
		< 3m	3-4m	4-5m	5-6m	6-30m	30-100m
Insecticides	à disque rotatif	0	2	7	10	10	10
	à lance	4	8	10	10	10	10
	tracteur + rampe	0	0	3	3	7	10
	avion	0	0	0	0	2	7
Herbicides	à disque rotatif	2	8	10	10	10	10
	à lance	4	8	10	10	10	10
	tracteur + rampe	0	0	4	4	8	10
	avion	0	0	0	0	2,5	7,5

Cas particulier :

Si la parcelle est drainée, alors le risque pour les eaux de surface prendra la valeur minimale entre le risque RESU et le risque RESO. Dans ce cas, la substance active qui se retrouve dans les drains va être déversée dans les eaux de surface mais provient de son lessivage à travers le sol.

4.2. Module « Risque pour l'air » (RAIR)

Seul la dérive engendrée par la technique d'application va changer. Voir tableau 23.

Tableau 23 – Notation des types d'appareils en fonction de la dérive aérienne engendrée (0 : Défavorable à 10 : Favorable).

Pays	Type d'appareils pour l'épandage	Notation (entre 0 et 10)
Mali	Pulvérisateur à disque rotatif	5
	Pulvérisateur à pression entretenue	8
Brésil/USA	Tracteur + Rampe	2
	Avion	0

5. Test de sensibilité et validation de l'indicateur

5.1. Test de sensibilité

L'analyse de la sensibilité des variables d'entrées dans l'indicateur ne sera pas exposé dans ce rapport, puisque les résultats obtenus seraient identiques à ceux présentés dans l'indicateur phytosanitaire grandes cultures (Voir Van der Werf et Zimmer, 1998), compte tenu du fait que l'agrégation des différentes variables est la même.

5.2. Validation de l'indicateur

La phase de validation de l'indicateur est un point clé de la pertinence de l'indicateur et se présente sous trois formes complémentaires. Tout d'abord la validation de la conception de l'indicateur. Elle consiste en la soumission de l'indicateur à un panel d'experts. C'est ce qui a été fait pour I-Phy par Van Der Werf et Zimmer, (1998).

La seconde validation de I-Phy_{ma} réside sur la comparaison entre des valeurs de sortie des modules RESO, RESU, RAIR et des mesures des concentrations de la substance active dans les eaux, des concentrations de substances actives dans l'air. Dans le cas du Mali, elle pourrait être réalisée, mais le temps imparti à cette étude est beaucoup trop court pour pouvoir mener à bien cette dernière étape. Il serait plus difficile de valider de la même manière les valeurs de I-Phy global pour une parcelle compte tenu du mode de construction de l'indicateur qui agrège des données de compartiments environnementaux disjoints.

Le troisième type de validation est la validation de l'indicateur par l'usage. Mais dans notre cas, l'indicateur n'a pas été encore utilisé comme un outil de diagnostic et d'aide à la décision.

Partie 3. Evaluation des pratiques phytosanitaires

1. Comparaison de l'impact environnemental entre les différentes façons de produire du coton au Mali

1.1. La culture conventionnelle

La base de données de la CMDT ne nous fournissait pas le type d'appareil utilisé pour l'épandage des phytosanitaires ni la distance au cours d'eau le plus proche. Ces données auraient pu être évaluées dans le pays pour chaque parcelle, mais cela n'a pas été possible durant la période de stage impartie.

1.1.1. Evaluation de l'impact environnemental selon les modes de protection insecticide pour un cas typique

Les parcelles de coton au Mali sont, dans la grande majorité des cas, situées à plus de 5 mètres d'un cours d'eau. L'épandage des phytosanitaires y est fait avec un appareil à disque rotatif. Cette situation type et généralisée à tout le bassin cotonnier, et va nous permettre d'évaluer l'impact environnemental au Mali. La base de données de référence indique juste le type de gammes utilisées. Ainsi, pour la gamme 2, les matières actives « Cyperméthrine + Acétamiprid » ont été retenues et pour la gamme 4, l'« Endosulfan » (Tableau 24).

Tableau 24 – Notes obtenues par l'indicateur phytosanitaire sur l'échantillon des 60 parcelles en fonction des pratiques agricoles.

Type d'exploitations	Pratiques agricoles	I-Phy min	I-Phy moy	I-Phy max
A	Cal	4,9	6,4	8,0
	Lec	5,2	6,7	7,6
B	Cal-P	5,6	6,9	7,8
	Cal-I	5,2	6,8	8,4
	Cal-T	5,0	6,6	7,3
	Lec-P	6,7	7,1	7,6
	Lec-I	4,8	6,5	8,1
	Lec-T		5,7	
C et D	Cal	4,5	5,9	8,2
	Lec	6,5	7,0	7,8

I-Phy_{Mali} = 6,7

Protection insecticide = Cal : Calendaire, Lec : Lutte étagée ciblée ; Date de semis soit : P : Précoce, I : Intermédiaire, T : Tardif.

Type d'exploitations classées en fonction de leur niveau d'équipement et de leur cheptel.

D'une manière générale, sur l'ensemble des I-Phy moyens, la note finale se retrouve légèrement au dessous de 7. Les pratiques agricoles maliennes de la culture conventionnelle ne sont pas sans impact sur l'environnement. Cet impact reste quasiment acceptable, ce qui ne veut pas dire qu'il n'y ait pas de marge de progrès.

La note I-Phy moyen du type d'exploitation A, est légèrement meilleure pour les traitements en Lutte étagée ciblée (Lec). Cela peut vouloir dire que les doses en Lec sont effectivement moins importantes que celles épandues en traitement calendaire. Mais les deux systèmes de protection restent néfastes pour l'environnement. Cet impact est engendré par l'emploi d'herbicides. Ces herbicides ont un impact important sur le module eaux souterraines et sur le module eaux de surfaces, compte tenu de leur potentiel élevé de mobilité dans le sol, leur potentiel de toxicité pour la faune aquatique et les caractéristiques du milieu. L'impact néfaste sur l'environnement de la campagne de traitements est aussi dû à l'utilisation de la substance « Endosulfan » qui est désormais interdite en Europe depuis le 2 juin 2006 (directive 91/414/CEE). Elle a une forte toxicité sur le milieu et se dégrade très lentement (environ 4mois), elle est de plus très volatile. Ses caractéristiques physico-chimiques et toxicologiques vont se répercuter sur le module air, vu le type d'appareil utilisé pour l'épandage et le type de climat propice à la volatilisation.

Pour le type B, plus on sème tard et plus la valeur de I-Phy coton se dégrade. Cela paraît incohérent dans la mesure où ceux qui traitent tardivement, appliquent généralement un traitement de moins que ceux ayant semé précocement. Pour les parcelles en protection calendaire, cela s'explique par l'emploi d'herbicides, pour les semis intermédiaires et tardifs. La matière active « Haloxyfop-R », herbicide de post-levée à forte toxicité (faune aquatique et homme) ayant été dans un des cas épandue sur sol complètement nu, engendre une note de 3,2 pour le module eau souterraine (Tableau 25).

Tableau 25 – Exemple pour une parcelle à Sinsin (code : 1_7_21_1): Valeurs de I-Phy matières actives pour une campagne de traitement à la parcelle. (Dose en g/ha).

Produit commercial	Matière active	Dose	RESO	RESU	RAIR	I-Phy _{ma}	R.Op
Saxal	Lindane	200	10	8,9	9,3	9,1	
Saxal	Thirame	250	10	8,9	9,9	9,3	
Gallant Super	Haloxyfop-R	56	3,2	7,5	6,3	5,2	
Thiofanex 500	Endosulfan	415	10,0	8,5	5,6	6,9	
Cytofos 286	Cyperméthrine	30	10,0	8,9	6,2	8,2	
Cytofos 286	Monocrotophos	208	9,0	8,9	6,0	6,9	
Cytofos 286	Cyperméthrine	30	10,0	8,9	6,2	8,2	
Cytofos 286	Monocrotophos	208	9,0	8,9	6,0	6,9	
Cytofos 286	Cyperméthrine	30	10,0	8,9	6,2	8,2	
Cytofos 286	Monocrotophos	208	9,0	8,9	6,0	6,9	

I-Phy_{parcelle} = 5,2

R.op = Risque
Opérateur

La

deuxième matière active agissant négativement sur la note finale, est encore une fois l'« Endosulfan » et la troisième étant le « Monocrotophos », un insecticide de la gamme 3.

Le « Monocrotophos » va avoir un fort impact sur le module air plutôt que sur les autres vu son potentiel élevé de volatilisation et le type d'appareil utilisé. Elle est de plus, utilisée à des doses de 210g/ha (Tableau 26). Pour les parcelles en traitement Lec, la baisse des notes est due aux mêmes raisons que pour le calendaire, mais dans ce cas, le type d'herbicide utilisé était le « Cotovic » à de très forte dose (>600g/ha).

Tableau 26 – Exemple pour une parcelle à Bowara (code 5_2_38_1) : Valeurs de I-Phy matières actives pour une campagne de traitement à la parcelle. (Dose en g/ha)

Produit commercial	Matière active	Dose	RESO	RESU	RAIR	I-Phy _{ma}	R.Op
Cotovic	Promethryn	613	7,2	7,2	7,0	5,3	
Cotovic	Fluométuron	613	6,2	7,8	7,0	5,6	
Duel 186	Cyperméthrine	11	10,0	8,9	6,2	8,9	
Duel 186	Profenofos	47	10,0	8,9	8,0	8,6	
Conquest C88	Cyperméthrine	27	10,0	8,9	6,2	8,3	
Conquest C88	Acétamiprid	6	10,0	8,9	8,4	9,6	
Conquest C88	Cyperméthrine	27	10,0	8,9	6,2	8,3	
Conquest C88	Acétamiprid	6	10,0	8,9	8,4	9,6	

I-Phy_{parcelle} = 5,3

R.op = Risque Opérateur

Il est difficile d'évaluer le traitement en Lec semis tardif car l'échantillon n'a retenu qu'une seule parcelle. Mais cette mauvaise note est due à l'emploi d' « Endosulfan » à forte dose (425g/ha), proche de la dose défavorable fixée à 500g/ha et employé sur un couvert mal développé du cotonnier.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, les petites exploitations ne sont pas les moins polluantes. Dans l'échantillon retenu, la majorité des parcelles en protection calendaire reçoit les 2 types d'herbicides à des doses importantes. Par contre, ceux en traitement Lec obtiennent une note de 7. Ce qui voudrait dire que les petits producteurs en traitement Lec, respecteraient mieux les doses que les grosses exploitations.

L'écart entre les notes de I-Phy min et I-Phy max, s'explique par des campagnes de traitement parcellaire avec ou sans emploi d'herbicides et/ou d' « Endosulfan ». Ces types de produits sont utilisés de manières homogènes, tous types de classes et de modes de protection insecticide confondus. L'utilisation de ces types de pesticides à fortes doses engendre ainsi une note de 6,7 pour le pays.

1.1.2. La production moyenne de coton graine

Les modes de protection du cotonnier influent de manière positive sur les rendements (Tableau 27). La protection en lutte étagée ciblée permet non seulement de meilleurs rendements pour les grosses exploitations ainsi que pour les petites, mais elle permet aussi un impact moins néfaste sur l'environnement que le traitement calendaire surtout pour les petites exploitations. Cependant le

passage en système Lec creuse l'écart en terme d'impact environnemental entre les grosses et les petites exploitations. La tendance semble inversée pour les exploitations du type B, qui restent majoritaires sur la zone cotonnière du Mali. L'écart de production reste cependant peu important. En comparant nos résultats avec les moyennes obtenues sur les 991 parcelles de la base de données, on remarque une cohérence des résultats pour les types A et B. Par contre, cela ne s'avère pas très juste pour le mode Lec des petits producteurs. Cette erreur repose sur l'échantillonnage du type C et D qui ne comportait que 3 parcelles.

Tableau 27 – Rendements coton-graine moyens (en kg) par mode de protection sur l'échantillon des 60 parcelles et des 991.

Types d'exploitations	Mode de protection pour...			
	Echantillon de 60 parcelles		Echantillon de 991 parcelles	
	Calendaire	Lec	Calendaire	Lec
A	946 (100%)	1230 (100%)	1037 (100%)	1168 (100%)
B	936 (99%)	905 (74%)	989 (95%)	969 (83%)
C et D	827 (87%)	948 (77%)	968 (93%)	797 (68%)

Lec = Lutte étagée ciblée

Type d'exploitations classées en fonction de leur niveau d'équipement et de leur cheptel.

1.1.3. Comparaison de l'impact environnemental dans différentes situations

Le risque des processus de transfert vers les eaux de surfaces, va être d'autant plus grand qu'on se rapproche des cours d'eau (Tableau 28). On remarque que le type d'appareil pour épandre les pesticides va jouer dans les deux situations. L'utilisation de l'appareil à dos au détriment de celui à disque va faire remonter la note de l'indicateur. On a une progression de plus de 1,5 dans le cas d'un cours d'eau < à 3 mètres. Une fois qu'on s'éloigne du cours d'eau et que le risque de contamination des eaux de surface par dérive est exclu, c'est le compartiment Air qui va jouer. Les appareils à dos limitant la dérive aérienne lors de l'épandage, permettent ainsi de réduire le risque pour le module air, et obtiennent ainsi de meilleure note que les appareils à disque. Le choix de l'opérateur pour son type d'appareil aura un poids important dans le risque environnemental final.

Tableau 28 – Comparaison de l'impact environnemental selon différentes pratiques agricoles suivant l'échantillon des 60 parcelles.

Types d'appareils	à disque rotatif		à dos	
Distance au point d'eau	< 3 m	> 5 m	< 3 m	> 5 m
Types d'exploitations	I-Phy moy	I-Phy moy	I-Phy moy	I-Phy moy
A	3,8	6,5	5,4	7,2
B	3,9	6,7	5,6	7,4
C et D	3,8	6,1	5,4	6,9

1.1.4. Simulation de I-Phy avec d'autres matières actives insecticides

D'autres matières actives classées en Gamme 1, 2 ou 4 ont été utilisées pendant la campagne de 2001 à 2003. Elles vont être testées par rapport à celles retenues au départ, pour voir l'effet de leurs impacts sur l'environnement et l'homme.

a. Pour la Gamme 1

La Gamme 1 des produits insecticides contient 2 types de produits. Le « Duel 186 EC » avec « Cyperméthrine + Profenofos » et le « Nurelle D » avec « Cyperméthrine + Chloropyriphos-éthyl ». Les deux matières actives contenues dans les produits sont respectivement concentrées à 36 et 150 g/Litre.

L'impact environnemental dégagé par la note final I-Phy_{Mali} du tableau 29, montre une pollution accrue de l'environnement causé par la matière active « Chloropyriphos-éthyl ». On passe de 6,7 à 5,8. Son fort potentiel de volatilisation et sa durée de vie élevée la rend polluante pour le compartiment « air ». Elle est de plus, très nocive pour l'opérateur. Cette matière néfaste pour l'environnement et l'homme a fort heureusement été utilisée uniquement pour la campagne de 2002.

Tableau 29 – Comparaison de deux produits de la Gamme 1 dans un exemple de valeurs de I-Phy matières actives pour un traitement à la parcelle. (Dose en g/ha)

Produit commercial	Matière active	Dose	RESO	RESU	RAIR	I-Phy _{ma}	R.Op
Nurelle D	Chlorpyriphos-éthyl	148,5	10,0	8,8	2,5	6,1	
Duel 186	Profenofos	148,5	10,0	8,8	8,0	8,4	

I-Phy_{Mali} = 5,8

R.op = Risque Opérateur

b. Pour la Gamme 2

Comme on l'a vu précédemment, la gamme 2 contient deux types de produits. Ces 2 produits contiennent la matière active « Cyperméthrine ». Cette dernière est concentrée à 36 g/L pour le Cyperfos 336 et 72 g/L pour le Conquest C88. Les deux autres matières actives utilisées sont respectivement le « Méthamidophos » dosé à 300g/L et l'« Acétamiprid » à 16g/L.

Le choix du type de matière active contenu pour la gamme 2 n'engendre pas de réelle différence en terme d'impact environnemental, étant donné le poids plus important de la matière active « Cyperméthrine » sur le milieu. La note de I-Phy_{Mali} resterait de **6,7**. (Tableau 30)

Par contre, il est intéressant de regarder le risque pour l'opérateur par rapport à ces 2 matières actives. Le « Méthamidophos » est dans tous les cas en risque « rouge » pour l'opérateur car il est très toxique pour ce dernier et la dose épandue est élevée (>200g/ha) dans tous les cas. La matière active « Acétamiprid » est classée en risque toxique (orange), mais si sa dose est épandue à moins de 15 g/ha, elle devient neutre, car cette substance reste peu toxique. Par conséquent, il serait important de privilégier le produit « Conquest C88 » au détriment du « Cyperfos 336 » pour la sécurité de l'opérateur.

Tableau 30 – Comparaison de deux produits de la Gamme 2 dans un exemple de valeurs de I-Phy matières actives pour un traitement à la parcelle (Dose en g/ha)

Produit commercial	Matière active	Dose	RESO	RESU	RAIR	I-Phy _{ma}	R.Op
Conquest C88	Cyperméthrine	83	10,0	8,8	6,12	7,6	
	Acétamiprid	18	10,0	8,8	8,5	9,2	
Cyperfos 336	Cyperméthrine	41	10,0	8,8	6,2	8,0	
	Métamidophos	345	10,0	9,0	7,5	8,0	

I-Phy_{Mali} = 6,7

R.op = Risque

Opérateur

c. Pour la Gamme 4

Les produits alternatifs aux pyréthrinoïdes classés en Gamme 4 sont aux nombres de 4. Ils ont été utilisés durant les campagnes de 2001 à 2003 et certains le sont encore actuellement.

- Profenofos

Les produits « Thiofanex » et « Tenor » sont employés à la même concentration, 500 g/Litre. Ils contiennent respectivement de l'« Endosulfan » et du « Profenofos ».

Le fait de substituer l'« Endosulfan » par du « Profenofos », permet de remonter la note I-Phy_{Mali}, à 7. La matière active « Endosulfan » est assez volatile et est très persistante dans l'environnement (4 mois), ce qui engendre un risque important pour le module air vu les pratiques agricoles utilisées et les conditions climatiques en zone tropicale. (Tableau 31)

D'autre part, bien que le « Profenofos » soit classé nocif pour l'opérateur, l'« Endosulfan » est classé dans la gamme des très toxiques. Il semblerait donc important d'abandonner l'« Endosulfan », puisque le « Profenofos » a les mêmes capacités que cette dernière substance.

Tableau 31 – Comparaison de deux produits de la Gamme 4 dans un exemple de valeurs de I-Phy matières actives pour un traitement à la parcelle (Dose en g/ha)

Produit commercial	Matière active	Dose	RESO	RESU	RAIR	I-Phy _{ma}	R.Op
Thiofanex 500	Endosulfan	540	10,00	8,83	5,58	6,93	
Tenor	Profenofos	540	10,00	8,83	8,00	8,13	

I-Phy_{Mali} = 7

R.op = Risque Opérateur

- Indoxacarb

L'« Indoxacarb » est contenue dans le produit « Avaunt 150 SC », et concentrée à 150g/L contre 500 g/L pour l'« Endosulfan ».

En remplaçant les produits « Thiofanex » par de l'« Avaunt », la note finale pour I-Phy_{Mali} remonte de plus d'un point et passe ainsi au dessus de la limite fixée par l'indicateur pour

l'environnement. Comme apparaît dans le tableau 32, « Indoxacarb » ne porte aucune atteinte aux différents compartiments de l'environnement. Même si la dose épandue était 3 fois plus forte

(500g/ha), cela ne porterait pas atteinte au milieu car cette substance active est peu volatile, peu mobile dans le sol et se dégrade assez rapidement.

Cependant, la prise de risque pour l'opérateur lors de l'épandage d'une telle substance est importante, car elle est toxique pour l'homme. Cette substance ne causera plus de tort aux opérateurs car elle a été supprimée du programme de traitement, après la campagne de 2001. Les causes citées par la CMDT, de ce désintéressement de cette substance étaient des raisons financières.

Tableau 32 – Comparaison de deux produits de la Gamme 4 dans un exemple de valeurs de I-Phy matières actives pour un traitement à la parcelle (Dose en g/ha)

Produit commercial	Matière active	Dose	RESO	RESU	RAIR	I-Phy _{ma}	R.Op
Thiofanex 500	Endosulfan	540	10,0	8,8	5,6	6,9	
Avaunt 150 SC	Indoxacarb	148	10,0	8,4	7,2	7,7	

I-Phy_{Mali} = 7,1

R.op = Risque Opérateur

- Spinosad

Le « Laser 480 SC » produit alternatif aux pyréthrinoïdes, contient la matière active « Spinosad » à 480 g/Litre. Tout comme l'« Indoxacarb », elle a été utilisée pour la campagne de 2001 puis supprimée pour les mêmes raisons que cette dernière. L'impact environnemental du « Spinosad » est encore moins nocif que celle de l'« Indoxacarb » (Tableau 33). La note I-PhyMali est aussi de 7,1, ce qui est tout à fait acceptable en terme d'impact environnemental. La toxicité de cette substance fait courir un risque élevé à l'opérateur durant l'épandage.

Tableau 33 – Comparaison de deux produits de la Gamme 4 dans un exemple de valeurs de I-Phy matières actives pour un traitement à la parcelle (Dose en g/ha)

Produit commercial	Matière active	Dose	RESO	RESU	RAIR	I-Phy _{ma}	R.Op
Thiofanex 500	Endosulfan	540	10,0	8,8	5,6	6,9	
Laser 480 SC	Spinosad	475	10,0	8,5	8,2	8,0	

I-Phy_{Mali} = 7,1

R.op = Risque Opérateur

Tous les insecticides utilisés au Mali sont toxiques pour l'opérateur. Bien qu'il n'y ait que 5 à 6 traitements par campagne, ils encourent un risque important à chaque traitement. Compte tenu du degré de protection des utilisateurs, il paraît urgent d'adapter ces matières actives et les conseils s'y afférant. Bien que certaines d'entre elles aient été supprimées des campagnes de protection, il n'en reste pas moins à faire pour les autres.

1.1.5. Pour les herbicides

Deux herbicides ont été testés par l'indicateur le « Gallant Super » et le « Cotovic ». Il en existe d'autres utilisés mais de façon minoritaire. Il est tout de même intéressant de tester leur impact sur le

milieu et l'opérateur (Tableau 34). On se place dans le cas où la parcelle est située à plus de 5 mètres d'un cours d'eau, avec l'épandage des phytosanitaires réalisé à l'appareil à disque rotatif.

Mise à part le « Glyphosate », tous les autres herbicides utilisés aux doses préconisées par la CMDT ont un impact sur les compartiments de l'environnement. Certaines de ces matières sont pourtant non nocives pour l'opérateur. Mais ces dernières, mêmes testées à des doses divisées par 10, restent toujours nocives pour l'environnement.

Tableau 34 – Comparaison des valeurs de I-Phy_{ma} pour les matières actives des différents herbicides utilisés au Mali.

Types d'herbicides	Nom du produit commercial	Matières actives	Concentration en m.a	Quantité préconisée	Note I-Phy _{ma}	Rop (*)
Prélevée	Action 800 SC	Diuron	800g/L	¾ L/ha	5,28	●●
	Cotovic	Prométhryne	250g/L	2,5L/ha	5,34	●
	Cotoforce	Fluométuron	250g/L		5,57	
	Cotogard					
	Callifor					
	Lasso	Alachlore + Atrazine	250g/L 350g/L	3,5 L/ha	4,74 6,28	●● ●●
	Cotodon plus 500	Métolachlore + Terbutryne	333g/L 167g/L	4L/ha	5,43 8,27	●●
Post-levée	Stomp 500 E	Metolachlore+ Pendiméthaline	160g/L 500g/L	4L/ha	5,13 4,79	
	Gallant Super	Haloxypop-R	108g/L	0,9L/ha	5,03	●
Totaux	Gramoxone	Paraquat	200g/L	3L/ha	6,72	●●
	Kalach	Glyphosate	360g/L	3L/ha	7,41	

(*) Risque pour l'opérateur ; I-Phy_{ma} : Note pour l'application d'une matière active

1.1.6. Evolution de la protection phytosanitaire jusqu'à aujourd'hui

En 2005, un nouveau plan de traitements insecticides a été élaboré par la recherche, qui préconise, selon les régions, les 2 premiers traitements du cotonnier par la Gamme 4, avec de l'« Endosulfan » (Sikasso, Bougouni, Kita) à 500 ou 330 g/l ou du « Profenofos » (Koutiala, San, Fana) à 500g/l sur une rotation de 3 ans. Le reste de la protection se fait avec des Gamme 2 ou des Gamme 3. Les produits de la gamme 1 ont été supprimés pour des raisons financières. Le fongicide chimique désormais utilisé est « Le Mistral de Senchim » (Endosulfan (25%) + Chlorothalonil (20%)).

a. Les fongicides

Le risque de pollution des compartiments de l'environnement par l'emploi des fongicides « Saxal » ou « Mistral de senchim » est acceptable. (Tableau 35). Les fongicides, pour le traitement des semences, sont utilisés avant le semis donc pas dispersés directement dans les champs. Même si

les doses du mistral étaient multipliées par 10, l'impact sur les différents compartiments n'augmenterait pas, car ces matières actives utilisées comme fongicide se retrouvent enfouies dans le

sol lors du semis. Bien que l'« Endosulfan » utilisé engendre un risque pour la pollution de l'air par son potentiel de volatilisation élevé, une fois enfoui, il est très peu mobile et donc inoffensif. Par contre, l'utilisation des fongicides reste nocive pour l'opérateur, même si il l'est un peu moins pour le « Saxal ».

Tableau 35 – Comparaison des deux fongicides utilisés en 2001-2003 et 2005 dans un exemple de valeurs de I-Phy matières actives pour un traitement à la parcelle (Dose en g/ha)

Produit commercial	Matière active	DOSE	RESO	RESU	RAIR	I-Phy _{ma}	R.Op
Saxal	Lindane	200	10	8,9	9,3	9,1	
	Thiram	250	10	8,9	10	9,3	
Mistral de Senchim	Endosulfan	38	10	8,9	9,7	9,6	
	Chlorothalonil	30	8,1	8,9	9,6	8,7	

R.op = Risque Opérateur.

b. Les herbicides

Il n'y a pas de préconisation faite sur les herbicides. Ils sont choisis selon la disponibilité du marché. Mais, aucuns herbicides actuellement disponibles ne cause de tort à l'homme et/ou à l'environnement.

c. Les insecticides

• Gamme 4

Comme on l'a vu dans le paragraphe **Partie 3-1.1.3.2**, l'utilisation de la substance active « Profenofos » est bien plus positive sur l'environnement que l'« Endosulfan ». Même à forte dose épandue (550 g/ha) sur une des parcelles de l'échantillon, l'impact de cette matière active était supérieur à 8 pour tous les compartiments de l'environnement. Mais, ces substances restent très nocives l'une comme l'autre pour l'opérateur, et il serait important d'en tenir compte vu le peu de protection employée pour l'épandage des produits chimiques.

• Produit de Gamme 2 et 3 (Pyréthroïdes)

La recherche préconise depuis 2005, l'utilisation de 2 produits dans la gamme 2, « Acétamiprid + Cyperméthrine » (16/72 g/ha) et « Métamidophos + Cyperméthrine » (36/300 g/ha). Toutes ces matières actives n'engendrent pas de risque de pollution si elles sont employées dans de bonnes conditions et aux doses prescrites. L'emploi de la matière active « Acétamiprid », employée à moins de 15 g/ha, est classée neutre pour l'opérateur, alors que le « Métamidophos » et la « Cyperméthrine » sont dans tous les cas dangereux pour ce dernier. Le produit de la gamme 3, assemble « Cyperméthrine + Monocrotophos » conseillé aux doses respectives de 36 g/ha et 300 g/ha. Le « Monocrotophos », employé à la dose conseillée engendre un risque pour l'environnement, mais si la

dose est ramenée à 100g/ha, l'impact sur l'environnement devient négligeable. Malgré tout, le risque pour l'opérateur reste très élevé compte tenu de la toxicité cette substance sur l'homme.

Dans l'ensemble, les résultats finaux dégagés par I-phy signalent un impact sur l'environnement. Les efforts qui ont été fait ces dix dernières années sur les appareils d'épandage et la réduction des quantités insecticides sont remarquables. Ceci dit, les problèmes résiduels sont le type de matières actives employées, herbicides et insecticides confondus. Il paraît urgent d'essayer d'adapter les programmes de traitements en intégrant des substances actives moins agressives pour l'homme et l'environnement. Aussi, Il serait important que la recherche prenne en considération les risques engendrés par les matières actives conseillées et qu'un programme de tests sur les caractéristiques physico-chimiques et toxicologiques des matières actives utilisées en milieu tropical soit fait.

1.2. La culture biologique

Le coton biologique est une culture qui utilise comme on l'a vu des biopesticides pour la protection de ces cotonniers. Ces biopesticides sont faits à partir de plantes naturelles et locales, qui contiennent des matières actives comme dans toutes les préparations. Seulement, pour le Mali, les préparations naturelles utilisées ne peuvent être rattachées à aucune famille de produits chimiques existants. Ainsi, nous n'avons pas pu rechercher leurs caractéristiques physico-chimiques, toxicologiques et écotoxicologiques. Sous réserve de n'avoir aucune donnée de l'impact de ces préparations en terme de toxicité sur l'homme, sur la faune auxiliaire, utile ou aquatique, nous supposons que la culture certifiée biologique est saine pour l'environnement et pour les opérateurs. La note de **10** lui est ainsi attribuée dans le cas du Mali.

1.3. La culture expérimentale

Les parcelles expérimentales du coton prototype et SCV testées en milieu paysan, se trouvent à des distances supérieures à 5 m d'un point d'eau ce qui n'engendre pas directement de pollution par risque de dérive pour le module « eau de surface ». Ces parcelles n'ont pas été non plus aménagées pour lutter contre le ruissellement car elles sont de très petites tailles. Les traitements phytosanitaires ont été réalisés à l'aide d'appareils à disque rotatif.

1.3.1. Le prototype

Le coton prototype obtient une note finale de **4,8** par l'indicateur phytosanitaire. Le fort impact sur l'environnement engendré par ce mode de culture est causé par l'utilisation de l'herbicide « Cotovic », épandu à 625g/ha. Elles ont un impact sur deux des modules de l'environnement calculé par I-Phy coton. L'impact sur les eaux souterraines est dû au fort potentiel de lessivage (GUS) des 2 substances actives. Le module des eaux de surface est touché par l'épandage de l'herbicide sur sol nu donc les matières actives sont susceptibles de ruisseler en cas de pluie. Par contre, il est intéressant de noter que ces deux substances ne sont pas toxiques pour l'opérateur. De plus, les premiers traitements

insecticides sont fait à l' « Endosulfan » (500g/ha), qui comme on l'a vu précédemment, est toxique aussi bien pour l'homme que pour le module air.

1.3.2. Le SCV

L'itinéraire technique du coton SCV obtient une note de **5,5** en terme d'impact environnemental. Cette note est inférieure à celle de I-Phy conventionnel. Ce résultat est attribuable à la matière active « Diuron » contenu dans l'herbicide « Action 80 DF » épandu à 800g/ha. Cette substance a un impact sur le module air, engendré par une persistance importante dans le sol (2 mois) et une Dose Journalière Admissible faible donc toxique. La culture SCV emploie tout comme le coton prototype la matière active « Endosulfan » à 500g/ha.

1.4. Comparaison des différents systèmes de culture entre eux

Les 4 pratiques agricoles, mis à part la culture biologique, ont un impact certain sur l'environnement (Tableau 36).

Tableau 36 – Notes moyennes attribuées à I-Phy_{coton} pour les 4 itinéraires techniques pratiqués au Mali.

Itinéraire Technique	Biologique	Conventionnel	SCV	Prototype
I-Phy _{coton}	10	6,7	5,5	4,8
Nombre de matières actives	3	18	5	8

Les itinéraires techniques de la culture expérimentale sont en moyenne plus nocifs que la culture conventionnelle sur l'environnement. Cet impact est attribuable aux herbicides et à l' « Endosulfan » employés. Mais le risque pour l'environnement est plus élevé pour les pratiques expérimentales, car les doses préconisées par la recherche sont réellement appliquées. Les pratiques expérimentales sont en phase test. Les doses testées par l'indicateur ne seront donc en aucun cas les doses préconisées pour la vulgarisation de ces modes de cultures au milieu paysan. L'impact sur l'environnement est en grande partie dû aux herbicides utilisés sur les champs de coton, qui contiennent des matières actives à fort potentiel de lessivage et/ou de volatilisation. La deuxième matière active qui porte défaut à l'environnement ainsi qu'à l'opérateur est l' « Endosulfan » à laquelle s'ajoute le « Monocrotophos » employé sur la culture conventionnelle. Mise à part, ces matières actives citées ci-dessus, les autres ne causent pas de tort à l'environnement avec les doses actuellement utilisées. Par contre, pour le module « risque opérateur », il n'y a que quelques substances actives qui ne soient pas toxiques pour l'utilisateur.

Ce module n'entre pas en compte dans le calcul de l'indicateur I-Phy_{coton}. Mais il est important d'en tenir compte car les agriculteurs maliens traitent leur champ sans aucune protection. Pour les fongicides, le risque pour l'opérateur n'est pas important car les graines de coton sont traitées avant le

semis. On suppose qu'ils ne doivent pas être en contact avec les produits très longtemps, et qu'ils ont la possibilité de se rincer à l'eau après l'opération. Par contre, aucun insecticide employé n'a d'effet non toxique sur l'opérateur, mis à part l'« Acétamiprid » employée à <15 g/ha.

Dans l'ensemble, les résultats finaux dégagés par I-phy signalent un impact sur l'environnement. Cet impact est souvent dû à l'emploi d'herbicides. Les efforts qui ont été fait ces dix dernières années sur les insecticides en terme d'équipement pour l'épandage et de réduction des quantités sont remarquables. Ceci dit, les problèmes résiduels sont le type de matières actives employées, herbicides et insecticides confondus.

Il paraît urgent d'essayer d'adapter les programmes de traitements sur le cotonnier en intégrant des substances actives moins agressives pour l'homme et l'environnement. Il serait donc important que la recherche prenne en considération les risques engendrés par les matières actives conseillées et qu'un programme de tests sur les caractéristiques physico-chimiques et toxicologiques des matières actives utilisées en milieu tropical soit fait.

2. Comparaison de l'impact environnemental entre les façons moyennes de produire du coton au Mali, Brésil, Etats-Unis

2.1. Au Brésil

La culture du coton au Brésil est fortement consommatrice de phytosanitaires. On dénombre 63 matières actives utilisées par la « fazenda Mourão » (ANNEXE 3), et jusqu'à 217 substances actives dans tout le pays (Silvie et al., 2006). L'indicateur a été testé sur 18 parcelles de la « fazenda Mourão », dans la région du Mato Grosso. Ces parcelles reçoivent une moyenne de 13 à 21 traitements phytosanitaires par campagne. Parmi les 63 matières actives qui sont utilisées, seules 34 matières actives ont été testées par I-Phy, car épandues sur les 18 parcelles testées.

La majeure partie du Brésil qui produit plus de la moitié de la production de tout le pays, bien que testée sur 34 matières actives, obtient une note de **0,4** dans le meilleur des cas (Tableau 37).

Tableau 37 – Valeurs moyennes de I-Phy_{Brésil} dans les différentes situations en fonction de la distance au point d'eau le plus proche des parcelles de coton.

Distance au point d'eau	30 à 100 m	> 100 m
Note I-Phy	0	0,4

Ces pratiques sont très polluantes pour l'environnement, compte tenu du nombre de traitements appliqués par campagne et des doses utilisées. Le module « air » est de loin le plus touché par les insecticides, vu le type d'appareil utilisé pour l'épandage des phytosanitaires et la capacité de volatilisation des matières actives (Tableau 38). Les doses appliquées varient de 150 g/ha à 700g/ha

pour les fongicides, de 100 g/ha à 960 g/ha pour les herbicides et de 35 g/ha à 600 g/ha pour les insecticides.

Tableau 38 – Exemple de l'impact de 3 matières actives testées lors d'une campagne de traitements.

Type de produits	Matière active	Dose	RESO	RESU	RAIR	I-Phy _{ma}
fongicides	Thiamethoxam	700	4,6	9,4	10,0	6,4
Insecticides	diafenthiuron	500	10,0	7,6	1,4	4,3
Herbicide	metolachlor	960	6,5	7,5	7,2	5,4

2.2. Aux Etats-Unis

Les données moyennes concernant les traitements phytosanitaires fournies par le site de l'USDA, cumulent un total de 27 matières actives employées pour les traitements du cotonnier en Caroline du Nord et 32 pour la Californie (ANNEXE 4), soit entre 15 et 20 traitements par campagne.

Le nombre de matières actives utilisées est moins important sur la culture de coton non irriguée. Cela peut signifier que la culture irriguée favorise l'installation de nouveaux pathogènes, nécessitant ainsi un nombre de traitements plus importants pour parer aux attaques. Le type de sol étant très variable au sein même des Etats, plusieurs possibilités ont été testées (Tableau 39).

Tableau 39 – Valeur de I-Phy_{Etats-Unis} pour les pratiques agricoles des Etats de la Caroline du Nord et de la Californie en fonction du type de sol et de la distance au point d'eau le plus proche des parcelles de coton.

Pays		Caroline du Nord		Californie
Distance au point d'eau		30 à 100 m	> 100 m	> 30 m
Type de sol	Sableux	1	1,2	0
	Limoneux	0,4	0,6	0
	Argileux	0	0,2	0

Les notes dégagées par l'indicateur montrent bien que la culture du coton irriguée est très néfaste pour l'environnement. Malgré un type de sol plus filtrant et une distance au point d'eau ne permettant plus de risque pour les eaux de surfaces par le type d'appareils utilisés, la note ne dépasse pas 0. La culture du coton non irriguée n'est guère plus favorable. Cet impact est lié au risque qu'encourt le module air dans la plupart des traitements (Voir tableau 40 et 41). Il est engendré, pour les mêmes raisons que celle du Brésil. La dose épandue va aussi jouer son rôle dans la note finale. Pour la Californie, on a des doses qui vont de 225 g/ha à 1594 g/ha pour les herbicides, de 7 g/ha à 1594 g/ha pour les insecticides et de 56 g/ha à 3065 g/ha pour les autres produits utilisés et notamment les desséchants foliaires. De même, pour la Caroline du Nord, on obtient des doses qui s'échelonnent

entre 146 g/ha et 618 g/ha pour les fongicides, 34 g/ha à 1560 g/ha pour les herbicides, 23 g/ha à 898 g/ha pour les insecticides et 56 g/ha à 3727g/ha pour les défoliants et autres produits chimiques.

Tableau 40 – Exemple de l'impact de 3/32 matières actives testées lors d'une campagne de traitements en Californie.

Type de produits	Matière active	Dose	RESO	RESU	RAIR	I-Phy _{ma}
Herbicide	pendiméthaline	921	10,0	5,5	3,6	4,8
Insecticides	phorate	1224	9,7	8,8	0,3	3,1
Autres	Sodium chlorate	3065	9,0	9,0	3,3	4,1

Tableau 41 – Exemple de l'impact de 4/27 matières actives testées lors d'une campagne de traitements en Carline du Nord.

Type de produits	Matière active	Dose	RESO	RESU	RAIR	I-Phy _{ma}
fongicides	Mefenoxam	146	6,4	9,6	10,0	7,7
Herbicide	pendiméthaline	763	10,0	5,5	3,6	4,9
insecticide	aldicarbe	752	4,2	6,4	2,3	3,9
autres	Monocarbamide dihyd.	3727	10,0	7,2	6	5,5

2.3. Comparaison de la culture conventionnelle du coton au Mali/Brésil/USA

La culture conventionnelle du coton au Brésil comme aux Etats-Unis, cause de grand risque de pollution pour l'environnement. Celle du Brésil est de loin la plus consommatrice de phytosanitaires, compte tenu des données que nous disposons. Elle a pourtant un impact moins important sur l'environnement que la culture irriguée en Californie. Cela étant dû en partie aux doses appliquées et aux caractéristiques toxiques et physico-chimiques des matières actives employées. On emploie plus d'une quinzaine de substances actives dans les 3 pays, mais le nombre de traitements et les doses épandues par campagne sont très différents. Au Brésil comme aux Etats-Unis, on applique en moyenne entre 15 et 20 traitements pesticides, contre 5 en moyenne au Mali (Tableau 42). Les campagnes de traitements emploient à la parcelle au maximum 6 matières actives pour le Mali contre plus d'une vingtaine pour les Etats-Unis et le Brésil. De plus, les doses appliquées à l'hectare sont 3 fois moins importantes au Mali qu'aux USA. Cela explique la grande différence d'impacts environnementaux entre les 3 systèmes de culture conventionnelle.

Tableau 42 – Impact sur l'environnement de la culture du coton dans la meilleure des situations pour les 3 pays (de 0 à 10). (Cas du Mali avec le « Profenofos »)

Pays	Mali	Caroline du Nord	Californie	Brésil
Notes I-Phy _{pays}	7	1,2	0	0,4
Nombre de matières actives max utilisées par campagne de traitement	6	> 20		
Nombres de traitements moyens par campagne	5	15 à 20		

Partie 4. Discussion et perspectives

1. L'échantillon sélectionné

L'impossibilité de tester les 991 parcelles de départ, nous a contraint à sélectionner un échantillonnage de 60 parcelles parmi la totalité. Cet échantillon représente environ 6% de celui de départ. Comme on a pu le montrer ci-dessus, les façons de protéger le cotonnier sont très hétérogènes même si un noyau central d'exploitations se concentre autour d'une pratique type. Les chances d'avoir une bonne représentativité exhaustive de toutes les pratiques agricoles sur culture conventionnelle dans un échantillon de 60 parcelles peuvent tout de même être biaisées. La façon dont a été répartie l'échantillonnage restent pour autant cohérent par rapport à l'échantillonnage des 991 parcelles. La répartition selon les modes de protections (Calendaire et Lec) ont pu être établie partout, mais la petitesse de l'échantillon n'a pas permis d'étendre les sous divisions des périodes de semis à tous les types d'exploitations.

2. L'indicateur phytosanitaire « I-Phy_{coton} »

2.1. La validation des résultats

Un travail complémentaire de validation devra être effectué en comparant les valeurs des modules de I-Phy_{coton} à des mesures de pollutions phytosanitaires effectuées sur des échantillons de sol, d'air ou d'eau. Cette « validation des sorties » permettra de dire si les résultats dégagés par l'indicateur restent cohérents ou non.

2.2. Les limites de I-Phy_{coton} :

L'indicateur présente un certain nombre de limites. Elles sont imposées par des lacunes scientifiques mais aussi par l'approche « indicateur » elle-même (disponibilité des données, nécessité de concision et de simplicité d'utilisation)

- Beaucoup d'informations ne sont pas disponibles, surtout dans un pays en voie de développement comme le Mali. C'est le cas par exemple :

- des caractéristiques de la formulation des produits phytosanitaires,
- des métabolites issus de la dégradation des produits phytosanitaires,
- des interactions entre substances actives dans un produit phytosanitaire,
- des interactions entre substances actives dans un mélange de bouillie de traitement,
- de l'adsorption des substances actives sur les poussières (risque « RAIR »).

- Les effets des pollutions ponctuelles ne sont pas pris en compte,

- Les effets sur la faune auxiliaire et utile (thermites, microfaune du sol, ...) ne sont pas pris en compte, faute de données disponibles.

Au Mali en particulier, de nombreuses structures et laboratoires existent sur les ravageurs du cotonnier, ils pourraient être intéressants d'y associer des tests sur l'impact des substances actives chimiques utilisées sur la faune auxiliaire et utile du cotonnier.

2.3. L'agrégation des variables

Les effets des substances actives sur la santé de l'opérateur sont pris en compte de façon indirecte par l'indicateur. Cette variable n'est pas intégrée à la construction de I-Phy, elle y est simplement juxtaposée. Il serait intéressant de l'inclure aux autres variables dans l'élaboration de la note finale, car les pays du Sud récupèrent très souvent les produits chimiques interdits et/ou invendus, et les épandent sans protection.

2.4. La notation

Une fois les arbres de décision mis en place pour donner plus ou moins d'importance à telle ou telle variable, l'indicateur nécessite l'attribution de notes. Ces notes sont évaluées à partir de la bibliographie et de références scientifiques. Dans le cas, du Mali, pays en voie de développement, ces études sont beaucoup trop onéreuses pour être menées à bien. Il n'existe par conséquent pas ou très peu de données sur des points précis comme la dérive engendrée par le type d'appareil utilisé et le type de buses, comme il peut en exister en Europe ou en Amérique du Nord. Ainsi, les notations imposées par l'indicateur, ont été attribuées de manière très subjective par les experts de terrain, ce qui peut fausser la notation finale de I-Phy_{Mali}. Cela n'aura par contre pas d'influence pour les comparaisons entre les itinéraires techniques, ni même pour les simulations entre matières actives, l'écart dégagé entre les notes restant fiables.

3. Les résultats

3.1 Au Mali

3.1.1. Les modes de protection insecticides

Les notes de I-Phy montrent un impact moindre sur l'environnement pour les types d'exploitations A, C et D en protection lutte étagée ciblée. Par contre, les résultats s'inversent pour le type B, ce qui paraît être un non sens comme signalé dans la **Partie.3.1.1**, pour la mise en place d'une lutte intégrée et donc la réduction des quantités d'insecticides. Le tableau 43 confirme cette incohérence des résultats et montre bien une diminution des quantités insecticides épandues pour ceux ayant adopté le mode Lec. Les quantités d'insecticides épandues, restent proportionnelles pour les 2 modes de protection entre les 2 échantillons. Il semblerait que l'impact généré par les herbicides ou par les produits alternatifs aux pyréthrinoides, soit plus important que les traitements insecticides de fin de cycle. De plus, en mode Lec, les doses sont réduites à partir du 2^{ème} voir 3^{ème} traitement insecticide. Cela va se ressentir faiblement dans I-Phy_{ma}, car les doses épandues sur les traitements de fin de cycle sont déjà 2 fois moins concentrées que ceux du début (ex : Endosulfan à 500g/ha). Il est important de le souligner car même si l'impact ne ressort pas de façon explicite dans I-Phy_{coton}, le mode Lec fait de réel effort quant à l'utilisation des insecticides.

Tableau 43– Quantités moyennes d’insecticides épandues par mode de protection, pour les campagnes de 2001 et 2002 (Litre/ha).

Types d'exploitations	Quantité moyenne d’insecticides épandus pour les campagnes de 2001 à 2002			
	Echantillon de 60 parcelles		Echantillon de 991 parcelles	
	Calendaire	Lec	Calendaire	Lec
A	0,96	0,65	0,92	0,68
B	0,99	0,74	0,91	0,67
C et D	0,91	0,65	0,91	0,73

3.1.2. Les rendements et les herbicides

Les notes finales dégagées par l’indicateur sont critiquables puisque l’échantillon de départ n’est pas forcément représentatif de tous les itinéraires techniques rencontrés au Mali même si il reflète bien la répartition des rendements. Cela se remarque notamment dans le calcul de la production moyenne de coton graine entre les 60 parcelles sélectionnées et les 991 de départ. Les résultats sont faussés pour les grosses et les petites exploitations, mais restent fiables pour le type B. Cette erreur est causée par un nombre trop petit d’exploitations de départ, sur lequel a été calculé l’impact environnemental. Il aurait été intéressant de comparer ces chiffres avec les valeurs de rendements moyens de toutes les exploitations de la zone cotonnière du Mali, mais il a été impossible de récupérer ces informations auprès de la CMDT.

L’impact environnemental dégagé par I-Phy semble aussi être biaisée par le nombre de parcelles utilisant des herbicides chimiques (Tableau 44). L’écart constaté sur les petites exploitations en traitement calendaire s’explique ainsi par un échantillon de départ de parcelles trop important utilisant des herbicides.

Tableau 44 – Pourcentage d’utilisation d’herbicides par type d’exploitations en fonction de l’échantillonnage.

Utilisation d’herbicides par types d’exploitations		Type A	Type B	Type C et D
Echantillon	60 parcelles	29 %	19 %	50 %
	991 parcelles	32 %	28 %	30 %

3.1.3. Le type d’appareil

Les notes attribuées aux pulvérisateurs du Mali ont été fixées d’après l’expérience des hommes de terrain. Elles sont ainsi sujettes à de nombreuses critiques car aucune bibliographie ne peut les confirmer. Il faudrait approfondir la nature de la dérive engendrée par chacun des appareils. Des simulations ont été effectuées sur la même base de $I\text{-Phy}_{\text{Mali}} = 6,7$. (Tableau 45)

Tableau 45 – Comparaison des notes I-Phy_{Mali} suivant une notation plus clémente envers le type de pulvérisateur (0 à 10)

Notation	5	6	7	8	9	10
Appareil à disque	6,7*	6,8	7	7,4	7,7	7,9
Appareil à dos				7,4*	7,7	7,9

* Notation actuelle

Ce tableau fait bien ressortir l'importance et le soin qui doit être apporté à la notation de chaque variable de l'indicateur. En augmentant la note de 2 points des pulvérisateurs à disque, I-Phy_{Mali} passerait à 7. L'importance ainsi donnée à la dérive aérienne, serait désormais moindre, remontant en conséquence l'impact de chaque matière active sur le module air. Etant donné, que nous ne sommes pas à même d'attribuer une notation de 5, 6, 7, ou 8 aux types de pulvérisateurs. Nous nous permettons simplement de le signaler.

3.1.4. La culture expérimentale

La culture SCV et l'itinéraire technique du coton prototype sont encore au stade expérimental. Ils sont en phase test et ne sont, par conséquent, pas prêts pour la vulgarisation au monde paysan. Les résultats obtenus quant à l'orientation phytosanitaires du moment ne sont que ponctuels (année 2005). Le « Diuron » par exemple, utilisé pour la culture SCV sera remplacé pour les campagnes futures. Ainsi, les résultats obtenus pourraient simplement être utilisés pour aider l'orientation future des programmes de traitements.

3.1.5. La culture biologique

Face aux problèmes que nous avons rencontrés quant aux matières actives contenues dans les biopesticides, il semble important que la recherche mette des priorités sur l'analyse de ces substances actives utilisées en culture biologique. L'analyse des caractéristiques physico-chimiques et toxicologiques des substances serait une première étape de validation de nos conclusions émises face à la culture biologique. Il est évident qu'une caractérisation exacte des solutions de chaque paysan reste délicate puisque le temps de macération de ces substances naturelles en solution est différent d'un paysan à un autre donc les métabolites de dégradations ou encore les interactions entre les substances ne seraient pas les mêmes. Mais il serait tout de même important de connaître les caractéristiques de chacune individuellement.

3.2. Aux Etats-Unis

Les valeurs de I-Phy_{Etats-Unis}, sont basées sur des valeurs moyennes du pays, tout comme les dates de semis. N'ayant pas les dates exactes de l'épandage des phytosanitaires, elles ont été estimées selon de bonnes pratiques environnementales en supposant que l'épandage se faisait une fois le couvert

végétal complètement couvrant. Il faudrait pour cela approfondir les recherches. Cela confirme l'impact élevé dégagé par I-Phy quant aux matières actives utilisées.

Il est difficile de conclure sur l'emploi d'OGM limitant la manipulation d'insecticide, vu les données moyennes sur lesquels se sont basés les calculs. Ceci dit, les biens faits économiques vantés de la culture OGM, ne paraissent pas ressortir sur l'impact environnemental dégagé par l'indicateur.

CONCLUSION

Dans un pays en voie de développement comme le Mali, l'environnement n'est pas une priorité absolue, vu les matières actives utilisées, qui sont souvent interdites dans les pays du Nord.

Pourtant, le choix des substances actives dans les pays du Sud, est à faire avec beaucoup de soin, car les protections inexistantes des opérateurs et le risque encouru par la pollution des eaux souterraines et de surface sont problématiques dans ces sociétés. L'accès aux traitements des eaux ou aux tris des déchets est inexistant. Les eaux courantes sont directement utilisées par les populations tout comme les puits. Il faut tout de même souligner les efforts mis en place par la CMDT, pour tendre vers un mode de lutte intégrée pour la culture du coton conventionnelle.

Malgré tout, des efforts restent à faire concernant le choix des phytosanitaires et des doses appliquées pour avoir un coton plus propre. Les herbicides restent appliqués à de trop grandes concentrations, tout comme certains insecticides interdits en Europe.

Il serait urgent d'essayer d'adapter les programmes de traitements et conseils y afférant en intégrant des substances actives moins agressives pour l'homme et l'environnement.

La recherche se doit de participer activement aux recherches sur le devenir de ces pesticides dans l'environnement et approfondir les caractéristiques physico-chimiques et toxicologiques de certaines substances actives en milieu tropical. Beaucoup de questions restent encore en suspend, comme leur vitesse de dégradation en zone tropicale et l'impact causé par ces métabolites.

L'impact environnemental des pratiques maliennes reste acceptable face aux systèmes de production américains ou encore brésiliens. Une labellisation s'appuyant sur l'aspect environnemental reste pourtant problématique. Il faudrait d'abord que les conseils promus par la CMDT visent à supprimer les molécules à risque, comme l'« Endosulfan » par exemple, au détriment de molécules moins agressives pour l'homme et l'environnement. Mais, le risque d'avoir des résistances aux ravageurs n'est pas à exclure, il faudra alors trouver d'autres molécules de substitution.

D'autres alternatives aux protections phytosanitaires sont développées au Mali et Brésil, comme la culture biologique. Elles restent pour l'instant très minoritaires. Elles utilisent des biopesticides, issu de la macération de plusieurs plantes naturelles, pour la protection de leurs cotonniers. Ces protections bien que naturelles, ne permettent pas d'affirmer un risque nul sur l'opérateur et l'environnement, mais elles laissent supposer un impact plus favorable.

Bibliographie

- Autray, P., and Sissoko, F. (2005). "Projet PASE - Rapport d'activités 2005." CIRAD/IER.
- Bachelier, J. S., Edmisten, K. L., Koenning, S. R., York, A. C., and Toth, S. J. (1999). Crop Profile for Cotton in North Carolina. <http://www.ipmcenters.org>.
- Bélières, J.-F., Douara, H., and Kébé, D. (2005). "Diversité des formes d'organisation des producteurs de riz et de coton au Mali : évolutions et perspectives pour un développement agricole durable." CIRAD/IER.
- CIRAD (2006). Tout savoir sur le coton. <http://www.cirad.fr>.
- Clayton, J. S., Bals, T. E., and Povey, G. S. (1993). "A new generation hand-held ULVA sprayer." ANPP-BCPC, Strasbourg.
- Deveze, J.-C., and Halley Des Fontaines, D. (2005). "Le devenir des agricultures familiales des zones cotonnières africaines : une mutation à conduire avec tous les acteurs - A partir des cas du Bénin, du Burkina Faso, du Cameroun et du Mali." AFD.
- Diallo, D. (2006). Gestion de l'Eau et des Sols sur Toposéquences Cuirassées en Afrique Occidentale : Limites des Méthodes Traditionnelles et Perspectives.
- Doumbia, B. (2003). Diagnostic agronomique de l'impact des pratiques paysannes sur le rendement du coton à Kara. Mémoire de fin d'étude, Institut polytechnique rural de formation de recherche appliquée, Katibougou.
- Fontes, E. M. G., Hilbeck, A., and Andow, D. A. (2006). "Environmental risk assessment of genetically modified organisms," CABI publishing.
- Girardin, P., and Bockstaller, C. (2003). "Méthode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode Indigo (version 1.31 du logiciel)." INPL Nancy, ENSAIA, INRA, ARAA.
- Hayo, M. (2003). Diagnostic agronomique de l'impact des pratiques paysannes sur le rendement du coton à Sinsin. Mémoire de fin d'étude, Institut polytechnique rural de formation de recherche appliquée, Katibougou.
- Hussein, K., Hitimana, L., and Perret, C. (2005). "La concertation sur la crise du coton en Afrique de l'Ouest et du Centre - Chronologie des événements clés 2001 à 2005." CSAO/OCDE.
- Kébé, D. (2001). "Évaluation économique de l'impact de la recherche sur le coton au Mali." Ministère de l'agriculture du Mali.
- Keita (2006). "Organic manure availability, food security and poverty relationships at farm level in the old cotton basin of Mali." IER/CIRAD.
- Mendez del Villar, P., Alvez, L. R. A., and Keita, M. S. (2006). Etude originale, macroéconomique et mondialisation : Facteurs de performance et de compétitivité des exploitations cotonnières au Brésil, aux États-Unis et au Mali. *Cahiers Agricultures* **15**, 23-34.

- Merceron, F., Traoré, D., and Zraggen, N. (2005). "Programme de promotion du coton biologique au Mali - Rapport annuel d'activités 2005." ONG Helvetas, Bamako.
- NCC (2006). National Cotton Council of America. <http://www.cotton.org/>.
- Rapidel, B., Traoré, B., Sissoko, F., and Doucouré, C. (2005). "Evolution des techniques culturales en zone cotonnière du Mali entre 1994 et 2002." CIRAD.
- Richardson, G. L. B. e. C. J. (2003). A spatially explicit investigation of phosphorus sorption and related soil properties in two riparian wetlands. In "Technical Report".
- Silvie (2003). "La protection phytosanitaire du cotonnier effectuée à la fazenda Mourão I."
- Silvie, P., Belot, J.-L., and Michel, B. (2006). "Manual de Identificação das Pragas e seus Danos no Algodoeiro." COODETEC/CIRAD.
- Thiollet, M. (2003). Construction des indicateurs viti-environnementaux de la méthode INDIGO, ENSAIA, Nancy-Colmar.
- Traoré, B. (2002). Diagnostic agronomique de l'impact des pratiques paysannes sur le rendement du coton à Katogo. Mémoire de fin d'étude, Institut polytechnique rural de formation de recherche appliquée, Katibougou.
- Turini, T. (2005). "Adaptation en milieu paysan d'un prototype d'itinéraire technique." CIRAD.
- USDA (2006). United States Department of Agriculture. <http://www.usda.gov>.
- Vaissayre (2005). "Coton et pesticides, gestion des populations de nuisibles en culture cotonnière." CIRAD.
- Van der Werf, H., and Zimmer, C. (1998). An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system. *Chemosphere* **36**, 2225-2249.
- Veenstra, J., Hortwath, W. R., Mitchell, J. P., and Munk, D. S. (2006). Conservation tillage and cover cropping influence soil properties in San Joaquin Valley cotton - tomato crop. *California agriculture* **60**, 146-156.
- Vergez, A., Croyère, A., and Jacquot, R. (2005). Défit pour le coton Ouest-africain. <http://www.inter-reseau.org>.
- Woody, A., and al., e. (2004). Leadership Tour of Brazil, a report. In "Beltwide cotton conferences", pp. 24-26.

GLOSSAIRE

D'après le guide AGRITOX – Base de données sur les substances actives phytopharmaceutiques. Définition des propriétés disponibles sur les fiches d'information.

DL 50 (Dose Létale 50) : Dose entraînant la mort de la moitié d'un lot d'animaux de laboratoire soumis au test après une administration unique de la substance active. La DL50 est exprimée en milligrammes de substance active par kilogramme de poids corporel.

☞ Préférer une DL50 élevée

CL 50 (Concentration Létale 50) : Concentration entraînant la mort de la moitié d'un lot d'animaux de laboratoire soumis au test pendant une période d'exposition déterminée (96 heures pour les poissons ; 14 jours pour les vers de terre). La CL50 est exprimée en milligrammes de substance active par litre.

☞ Préférer une CL50 élevée

DJA (Dose Journalière Acceptable) : Dose pouvant être ingérée quotidiennement par le consommateur durant toute la vie, sans effet pour sa santé. La DJA est exprimée en milligrammes de substance active par kilogramme de poids corporel et par jour.

☞ Préférer une DJA élevée

DT 50 : Nombre de jours nécessaire à la dégradation (persistance en laboratoire) ou à la dissipation (persistance en plein champ) dans le sol de la moitié de la substance active.

☞ Préférer une DT50 courte

GUS (Groundwater Ubiquity Score) : Aptitude d'une substance active en solution à être lessiver.

GUS élevé : substance active peu lessivable

GUS faible : substance active très lessivable

☞ Préférer un GUS élevé

Koc (Coefficient de partage carbone organique - eau) : Mesure de la mobilité d'une substance active dans le sol.

Koc élevé : substance active peu mobile

Koc faible : substance active très mobile

☞ Préférer une Koc élevée

KH (Constante de Henry) : Aptitude d'une substance active en solution à se volatiliser. La constante de Henry est exprimée en Pascal/m³/mole.

KH élevé : substance active peu volatile

KH faible : substance active très volatile

☞ Préférer une KH élevée

Métabolites : produits de dégradation des constituants des produits phytosanitaires.

AOEL : la dose d'exposition acceptable pour l'applicateur désigne la quantité maximum de substance active à laquelle l'opérateur peut être exposé quotidiennement, sans effet dangereux pour sa santé.

ARfD : la dose de référence aiguë désigne la quantité maximum de substance active qui peut être ingérée par le consommateur pendant une courte période (c'est à dire au cours d'un repas ou d'un jour, dans la nourriture ou l'eau de boisson), sans effet dangereux pour sa santé.

L'Aquatox

L'Aquatox, reflète les effets biologiques de la substance active sur trois représentants majeurs de la chaîne trophique : les algues (végétaux), les Daphnies (invertébrés) et les poissons (vertébrés). Le risque pour l'écosystème étant celui encouru par sa composante la plus sensible, nous ne retenons que la toxicité pour l'espèce la plus sensible (Van Der Werf et Zimmer, 1998).

LAI (Leaf Area Index, l'indice foliaire)

L'indice foliaire est la surface foliaire (des feuilles) projetée par unité de surface au sol. Ce nombre est donc exprimé en m² de feuilles par m² de sol.

Organochloré : Se dit d'un produit organique de synthèse dérivé du chlore et utilisé notamment comme solvant, pesticide, insecticide, fongicide ou réfrigérant ou molécules intermédiaires de synthèse (chimie, pharmacie).

ANNEXES

ANNEXE 1

Classement des insecticides par gamme d'efficacité

Les produits insecticides sont classés en 4 gammes d'efficacité:

Produits pyréthrinoïdes

Gamme 1 : Produits actifs contre les chenilles carpophages et phyllophages ;

Gamme 2 : Produits actifs contre les chenilles carpophages et les piqueurs suceurs ;

Gamme 3 : Produits actifs contre les chenilles carpophages, les chenilles phyllophages et les piqueurs suceurs

Produits organochlorés et organophosphorés

Gamme 4 (Produits alternatifs aux pyréthrinoïdes) : Produits actifs contre les carpophages de façon générale et en particulier contre *Hélicoverpa armigera* (qui devient de moins en moins sensible aux pyréthrinoïdes).

ANNEXE 2

Liste des matières actives utilisées sur le coton dans la «fazenda Mourão »

Fongicides	Herbicides	Insecticides	Régulateur de croissance
azoxystrobin * carbendazim carboxin epoxiconazole pencycuron * propiconazole * pyraclostrobin tebuconazole * teflubenzuron thiachloprid * thiamethoxam * thiodicarb thiram tolyfluanide * triadimenol triazophos trifloxystrobine * zeta-cypermethrine *	2,4 D * atrazine * carfentrazone-ethyl chlornazone diuron * ester méthyl fluazifop p butyl flumioxazine * glufosinate d'ammonium glyphosate * haloxyfop - R * métolachlore * MSMA * paraquat * Pirithiobac sodium trifloxysulfuron sodium * trifluraline	acetamiprid * alpha-cypermethrin * benfuracarbe * beta-cyfluthrin bifenthrine carbofuran * clorfluazuron cyfluthrin deltamethrin diafenthiuron * ensodulfan * esfenvalerate fenitrothion imidacloprid indoxacarbe * lambda-cyhalothrin * lufenuron méthamidophos * methomyl * monocrotophos novaluron * parathion-methyl permethrine * profenofos spinosad	chlrorure de mepiquat ethefon * cyclanilide *

* Matières actives testées par l'indicateur I-Phy_{coton}

Total = 63 m.a

ANNEXE 3

Liste des matières actives utilisées sur le coton aux Etats-Unis

Types de phytosanitaires	m.a de la Caroline du Nord	m.a de la Californie
Fongicides	Etridiazole Mefenoxam PCNB	
Herbicides	2, 4, D Carfentrazone, ethyl Fluometuron Glyphosate MSMA Paraquat Pendimethalin Prometryn Pyrithiobac, sodium S, Metolachlor	Carfentrazone, ethyl Diuron Glyphosate Oxyfluorfen Paraquat Pendimethalin Pyrithiobac, sodium Prometryn S, Metolachlor Trifluralin
Insecticides	Acephate Aldicarb Cyfluthrin Cypermethrin Dicrotophos Lambda, cyhalothrin Phorate Zeta, cypermethrin	Abamectin Aldicarb Chlorpyrifos Cyfluthrin Dicofol Dimethoate Imidacloprid Indoxacarb Oxamyl Phorate Propargite Pyriproxyfen Tebufenozide Thiamethoxam
Autres : Régulateur de croissance + Défoliant + Desséchant	Ethephon Cyclanilide Mepiquat chloride Monocarbamide dihyd. Thidiazuron Tribufos	Cyclanilide Endothall Ethephon Mepiquat chloride Monocarbamide dihyd. Sodium chlorate Thidiazuron Tribufos
TOTAL	27 m.a	32 m.a

ANNEXE 4

L'indice de Gustafson (GUS)

Nous utilisons l'indice d'ubiquité de Gustafson, un indice simple et capable de permettre la distinction entre les pesticides qui sont lessivés et ceux qui ne le sont pas, et aussi car il est disponible pour toutes les substances actives. Il est construit à partir de la DT50 et du Koc de la substance active suivant l'équation ci-dessous :

$$\text{GUS} = \log_{10} (\text{DT50}) * (4 - \log_{10} (\text{Koc}))$$

Avec :

- DT50 : demi-vie au champ de la substance active (jours) ;
- Koc : coefficient de partage carbone organique/eau de la substance active (ml/g).

Règles de décision :

- Pour la DT50, les valeurs au champ sont utilisées prioritairement sauf en cas de forte volatilisation ou de risque important de lessivage. Dans ce dernier cas, nous utilisons les données de laboratoire.
- Pour la DT50 et le Koc, la règle générale a été de prendre la moyenne ou valeur sélectionnée à partir de la base AGRITOX ou de celle du Comité de Liaison (Dabene et Marié, 1993). Si un intervalle de valeur est donné sans moyenne, nous prenons la valeur médiane. Cependant s'il y a contradiction avec d'autres bases ou des informations complémentaires sur le comportement de la molécule au champ, nous choisissons une valeur soit plus favorable soit moins favorable. Pour cela nous utilisons la source pour laquelle la valeur de la base est jugée la plus fiable ; la fiabilité étant estimée à partir du nombre de valeurs proposées, des données complémentaires sur les sols utilisés ou de l'origine des données. En cas d'absence de valeurs, ou si les valeurs des bases AGRITOX ou du Comité de Liaison sont jugées peu fiables (ex : une valeur estimée, une seule valeur ou des valeurs sur sols peu représentatifs), le *Pesticide Manual* 2005 est privilégié selon les mêmes règles qu'avant.

ANNEXE 5

L'agrégation des variables pour les différents modules retenus pour I-phy Récapitulatif des limites des classes Favorable et Défavorable

La méthode d'agrégation par système expert associé à la logique floue nécessite de mettre en classes les différentes variables et de définir les conclusions des règles de décisions.

Pour cela une synthèse bibliographique et la consultation d'experts ont été nécessaires.

1. Pour les variables du module RESO

GUS	Valeur Favorable	Valeur Défavorable	Classe Floue
GUS	< 1,8	> 2,8	Courbe sigmoïdale
Position application	0	1	Courbe sigmoïdale
Potentiel lessivage	0	1	Courbe sigmoïdale
DJA (mg.kg-1)	0	0,0001	Courbe sigmoïdale

2. Pour les variables du module RESU

Substance active	Valeur Favorable	Valeur Défavorable	Classe Floue
DT50	1	30	Courbe sigmoïdale
Potentiel ruissellement	0	1	Courbe sigmoïdale
Potentiel dérive	0	1	Courbe sigmoïdale
Position d'application	1	0	Courbe sigmoïdale
Aquatox (mg.l-1)	100	0,01	Courbe sigmoïdale

3. Pour les variables du module RAIR

Substance active	Valeur Favorable	Valeur Défavorable	Classe Floue
K _H (constance de Henri)	2,65.10 ⁻⁶	2,65.10 ⁻⁴	Courbe sigmoïdale
Dair	0	1	Courbe sigmoïdale
DT50 (jours)	1	30	Courbe sigmoïdale
Position d'application	1	0	Courbe sigmoïdale
DJA (mg.kg-1)	0	0,0001	Courbe sigmoïdale

4. Pour les variables Dose

Dose (g/ha)	Valeur Favorable	Valeur Défavorable	Classe Floue
Substance active	< 10	> 10 000	Courbe sigmoïdale

5. Pour la variable du module ROP (estimé à partir du logiciel POEM)

Dose (g/ha)	Valeur Favorable	Valeur Défavorable	Classe Floue
Substance active (Mali)	< 1	> 50	Courbe sigmoïdale



Cas Défavorable



Cas Favorable

ANNEXE 6

Règles de décision pour la variable Potentiel de lessivage.

Taux de matière organique dans le sol

Pauvre
(<3%)

Moyen
(3 à 5%)

Faible
(>5%)

Texture et cailloux dans le sol

Texture et cailloux dans le sol

Texture et cailloux dans le sol

Filtrant

Non Filtrant

Filtrant

Non Filtrant

Filtrant

Non Filtrant

Profondeur du sol

Profondeur du sol

Profondeur du sol

Profondeur du sol

Profondeur du sol

Profondeur du sol

Super
ficiel

Moyen
Profond

Super
ficiel

Moyen
Profond

Super
ficiel

Moyen
Profond

Super
ficiel

Moyen
Profond

Super
ficiel

Moyen
Profond

Super
ficiel

Moyen
Profond

1

0,8

0,8

0,4

0,9

0,7

0,7

0,2

0,8

0,6

0,4

0

Profondeur du sol : superficiel = inférieur à 30 cm ; moyen = entre 60 et 90 cm ; profond = supérieur à 90 cm.

Les sols filtrants sont des sols à forte teneur en cailloux et plutôt sableux tandis que les sols non filtrants sont à forte teneur en argile et/ou en limons sans présence de cailloux.

ANNEXE 7

Définition de la variable potentiel de ruissellement

1. Mali et Brésil

Pente	Type de sol				
	Sableux ^a	Limoneux <i>Battance</i>		Argileux ^b <i>Hydromorphe</i>	
		Non	Oui	Non	Oui
Nulle	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Faible [0-2%]	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6
Moyenne [2-5%]	0,75	0,75	0,8	0,75	0,8
Forte (>5%)	1	1	1	1	1

a = les classes « sableux » et « sablo-argileux »

b = les classes « argile lourde », « argileux », « argilo-limoneux » et « argilo-sableux »

Tableau 8 - Construction de la variable potentiel de ruissellement en fonction de la pente de la couverture et de la texture du sol de la parcelle selon bibliographie et dire d'experts.

Les valeurs du potentiel de ruissellement ont été accentuées par rapport à celles fixées par l'indicateur I-Phy adapté à l'arboriculture et aux vignes, compte tenu du fait que le Mali et le Brésil sont situés dans une zone tropicale où les pluies sont de très fortes intensités.

Facteur correctif de la variable potentiel de ruissellement au Mali uniquement :

Le potentiel de ruissellement d'une parcelle peut être limité par des conditions particulières ou par des aménagements. Dans le cas du Mali, la CMDT a introduit la lutte anti-érosive depuis mai 1986 et certains paysans la mettent en place :

- Si il y a présence d'un aménagement en courbe de niveau surmonté d'un ados,
Alors le potentiel de ruissellement est divisé par 3.
- Si il y a présence de diguettes,
Alors le potentiel de ruissellement est divisé par 1,5.
- Si il y a présence de haies vives.
Alors le potentiel de ruissellement est divisé par 1,25.
- S'il y a présence de cordon pierreux,
Alors le potentiel de ruissellement est divisé par 1,25.
- Si présence de fascine : ce sont des résidus de branches/tiges séchées du cotonnier que l'on dépose dans les rigoles
Alors le potentiel de ruissellement reste celui calculé à l'aide du **tableau 8**.

2. *Etats-Unis*

Pour les Etats-Unis, faute de données précises, les valeurs du potentiel de ruissellement reste les mêmes que pour celle mise en place pour I-Phy grandes cultures (Vander Werf et Zimmer, 1999).

Pente	Type de sol				
	Sableux ^a	Limoneux <i>Battance</i>		Argileux ^b <i>Hydromorphe</i>	
		Non	Oui	Non	Oui
Nulle	0	0	0	0	0
Faible]0-2%]	0,1	0,25	0,4	0,25	0,5
Moyenne [2-5%[0,3	0,5	0,75	0,5	0,75
Forte (>5%)	0,6	0,75	1	0,75	1

(Girardin and Bockstaller, 2003)

ANNEXE 8

Classement toxicologique des substances actives selon l'OMS.

Indicateur de toxicité	Formulation	Classement de la substance active			
		Neutre (N)	Nocif (Xn)	Toxique (T)	Très toxique (T ⁺)
DL ₅₀ orale (mg/kg)	solide	DL ₅₀ > 500	50 < DL ₅₀ ≤ 500	5 < DL ₅₀ ≤ 50	DL ₅₀ ≤ 5
	liquide	DL ₅₀ > 2000	200 < DL ₅₀ ≤ 2000	25 < DL ₅₀ ≤ 200	DL ₅₀ ≤ 25
DL ₅₀ cutanée (mg/kg)	solide	DL ₅₀ > 1000	100 < DL ₅₀ ≤ 1000	10 < DL ₅₀ ≤ 100	DL ₅₀ ≤ 10
	liquide	DL ₅₀ > 4000	400 < DL ₅₀ ≤ 4000	50 < DL ₅₀ ≤ 400	DL ₅₀ ≤ 50
CL ₅₀ inhalation (mg/l air)	poudre/aérosol	CL ₅₀ > 20	2 < CL ₅₀ ≤ 20	0,5 < CL ₅₀ ≤ 2	CL ₅₀ ≤ 0,5

Résumé

Le coton est une fibre végétale tissée depuis plus de 8000 ans. Il est cultivé en Afrique de l'Ouest depuis le début du XX^{ième} siècle. Il représente une source de devises étrangères et d'emploi rurale important pour ces pays. Depuis les années 90, le coton africain subit une crise engendrée par des distorsions du marché provoquées par les politiques de soutien de quelques pays.

Une manière de limiter les effets de ces évolutions serait de développer un label de qualité du coton produit en Afrique. Un des points sur lesquels pourrait se fonder ce label est l'aspect environnemental : le coton a besoin de traitements insecticides fréquents, mais les insectes présents en Afrique sont beaucoup moins virulents que les insectes présents en Amérique. Au Mali, la culture du coton est peu intensive et récoltée manuellement, en comparaison aux grosses exploitations entièrement mécanisées du Brésil ou des Etats-Unis. La protection du cotonnier demande plus de 15 traitements insecticides en Amérique contre 5 au Mali à des doses bien inférieures.

Afin d'évaluer quantitativement l'impact environnemental de la culture du coton, l'étude s'appuie sur un indicateur agro-environnemental. Cet indicateur adapté aux différentes pratiques agricoles et conditions du milieu montre un impact acceptable de la culture de coton au Mali, à l'inverse de celles des Etats-Unis et du Brésil. Malgré tout, un effort reste à fournir pour adapter les campagnes de traitements du cotonnier au Mali, qui restent trop souvent dangereuses pour l'opérateur.

Mots clés : environnement, coton, pratique agricole, produit phytosanitaire, matière active, indicateur agro-environnemental.

Abstract

Cotton has been a vegetable fibre woven for more than 8000 years. It is cultivated in West Africa since the beginning of the twentieth century. Cotton is economically and socially interesting. However, Since the Nineties, African cotton undergoes a crisis generated by market's distortions caused by some countries' subsidies.

To limit the effects of these evolutions, an alternative would be to develop a quality control mark of the cotton produced in Africa. This label could be based on environmental aspects: cotton needs frequent insecticides treatments, but African insects are less virulent than American ones.

In Mali, cotton cultivation is not very intensive and the harvest is done manually, whereas it is entirely mechanized in Brazil and in the United States. The protection of cotton-plant requires more than 15 insecticides treatments in America against 5 in Mali where the quantity used are lower.

In order to assess the sustainability of the cotton cultivation, the study is based on an agro-environmental indicator. This indicator, adapted to various agricultural practices and environment conditions, shows an acceptable impact of the cotton cultivation in Mali, contrary to those of the United States and Brazil. Nevertheless, an effort has to be done to adapt the treatment campaigns of cotton-plant in Mali, which remain too hazardous for the operator.

Key words : environment, cotton, agricultural practise, pesticide, active ingredient, agro-environmental indicator.